



Universitat de Lleida

TREBALL FINAL DE GRAU



ESCOLA
POLITÈCNICA SUPERIOR
UNIVERSITAT DE LLEIDA
INSPIRING THE FUTURE

Estudiant: Roger Arasanz Riba

Titulació: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol de Treball Final de Grau: Metodologia per a la caracterització d'un sistema de vegetació vertical mitjançant un escàner làser terrestre mòbil basat en un sensor LiDAR

Director: Gabriel Pérez

Codirector: Alexandre Escolà

Presentació

Mes: Juliol

Any: 2018

AGRAIMENTS

Agraeixo al director d'aquest treball, el Dr. Gabriel Pérez Luque, la motivació i recolzament des de l'inici del treball, així com els seus valuosos consells.

Igualment dono les gràcies, al codirector del treball, el Dr. Alexandre Escolà Agustí pel seu imprescindible suport i constant assessorament.

També expresso el meu agraïment al Dr. Eduard Gregorio López pel seu valuós seguiment realitzat al llarg de tot el procés, i al Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió (GRAP) per la seva col·laboració amb l'adquisició de dades.

Voldria destacar especialment les aportacions del Bernat Marrero Farré, que amb el seu treball final de grau ha complementat el meu donada la naturalesa comparativa dels dos treballs.

Finalment, vull agrair als meus pares i a la meva germana el seu suport incondicional.

INDEX

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓ | 6 |
| 1.1 | Arquitectura vegetada en façanes | 6 |
| 1.1.1 | Beneficis de la vegetació present en façanes..... | 7 |
| 1.2 | Agricultura de precisió i caracterització de la vegetació..... | 8 |
| 1.3 | Antecedents de recerca | 9 |
| 1.3.1 | Importància del LAI | 9 |
| 1.3.2 | Descripció de les mesures del LAI | 12 |
| 1.3.3 | Comparativa entre sensors | 14 |
| 1.4 | Objectiu | 17 |
| 1.4.1 | Objectiu general | 17 |
| 1.4.2 | Objectius parcials | 17 |
| 2 | MATERIALS I MÈTODES..... | 18 |
| 2.1 | Hardware..... | 18 |
| 2.1.1 | Escàner làser terrestre mòbil | 18 |
| 2.2 | Programari..... | 19 |
| 2.2.1 | Adquisició de dades..... | 19 |
| 2.2.2 | Generació dels núvols de punts | 19 |
| 2.2.3 | Visualització i edició dels núvols de punts | 19 |
| 2.2.4 | Càlculs generals | 20 |
| 2.2.5 | Tractament estadístic..... | 20 |
| 2.3 | Escaneig experimental de les façanes..... | 20 |
| 2.4 | Caracterització geomètrica del sistema VGS..... | 22 |
| 2.5 | Processament dels núvols de punts | 24 |
| 2.5.1 | Presa de contacte amb arxius | 24 |
| 2.5.2 | Construcció del cub | 24 |
| 2.5.3 | Neteja dels murs | 25 |
| 2.5.4 | Càlcul de les distàncies a la que es troben els punts respecte la façana | 26 |
| 2.5.5 | Rasterització de les façanes | 26 |
| 2.6 | Càlcul del volum de vegetació i classificació dels punts..... | 27 |
| 2.6.1 | Càlcul del volum | 28 |
| 2.6.2 | Classificació de les cel·les per columnes, files i quadrants..... | 30 |
| 3 | RESULTATS..... | 32 |
| 3.1 | Caracterització del volum de vegetació per façanes..... | 32 |



| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1.1 | Façana Est..... | 32 |
| 3.1.2 | Façana Oest | 34 |
| 3.1.3 | Façana Sud..... | 36 |
| 3.2 | Comparació entre façanes | 38 |
| 3.3 | Comparació entre sensors i relació dels volums per quadrants segons el sensor..... | 39 |
| 3.4 | Relació entre volum de vegetació i LAI | 42 |
| 3.4.1 | Lectures de LAI indirecte | 42 |
| 3.4.2 | Lectures de LAI directe (2013) - Façana Est | 44 |
| 3.5 | Relació entre volum de vegetació i temperatura..... | 45 |
| 4 | CONCLUSIONS..... | 47 |
| 5 | BIBLIOGRAFIA | 49 |

INDEX DE FIGURES

| | |
|--|----|
| Figura 1. Instal·lacions experimentals de Puigverd de Lleida. | 12 |
| Figura 2. Visualització del procés destructiu de la mesura del LAI (d'esquerra a dreta). | 13 |
| Figura 3. Mesures fetes amb el ceptòmetre Sunfleck PAR durant un dia ennuvolat d'estiu de 2015..... | 13 |
| Figura 4. Resultats de la mesura indirecta del LAI . Els resultats de la columna central es van obtenir fent la mitjana entre els dos valors obtinguts en el mateix nivell. | 14 |
| Figura 5. Diagrama del sistema MTLs i els seus components. | 19 |
| Figura 6. Detall del sistema de suport construït el 2012 (a) i vista general del cub (b). Detall (c) i vista general (d) del sistema de vegetació plenament desenvolupat..... | 21 |
| Figura 7. Esquema de les mesures realitzades amb el sensor Hokuyo al cub de l'estudi..... | 21 |
| Figura 8. Vista del MTLs basat en el sensor LiDAR durant l'escaneig. | 22 |
| Figura 9. Vista en planta de la fusió dels 4 arxius de núvols de punts, donant color a cada punt segons la seva alçada per facilitar-ne la seva interpretació visual, sent els punts blaus al nivell de terra i els punts verds sobre les diferents façanes..... | 23 |
| Figura 10. Vista en planta del cub estudiat, resultat de la fusió dels 4 arxius, donant color als punts segons la seva alçada; sent els punts blaus al nivell del terra i els punts vermells els més alts. | 23 |
| Figura 11. Vista en planta del cub sense els murs (esquerra) i amb els murs (dreta). | 25 |
| Figura 12. Resultat final de la creació dels murs en perspectiva. | 25 |
| Figura 13. Vista en alçat (a), planta (b) i perfil (c) de la façana est netajada. El color dels punts indica la distància d'aquests respecte la paret sent els punts blaus els més propers a la paret i els vermells els més allunyats. | 26 |
| Figura 14. Vista en detall del sistema VGS en la seva etapa inicial amb les distàncies utilitzades pels càlculs. | 29 |
| Figura 15. Núvol de punts de la façana est. El color dels punts ens indica la distància d'aquests respecte la paret essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans. | 32 |
| Figura 16. Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació per cel·la de la façana est. | 32 |
| Figura 17. Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) del volum de vegetació per cel·la per les diferents files, columnes i quadrants de la façana est. | 33 |
| Figura 18. Núvol de punts de la façana oest. El color dels punts ens indica la distància d'aquests respecte la paret essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans. | 34 |
| Figura 19. Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació per cel·la de la façana oest. | 34 |
| Figura 20. Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) de les diferents files, columnes i quadrants de la façana oest. | 35 |
| Figura 21. Núvol de punts de la façana sud. El color dels punts ens indica la distància d'aquests respecte la paret essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans. | 36 |
| Figura 22. Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació per cel·la de la façana sud. | 36 |
| Figura 23. Diagrames de caixa (box plot) , mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) de les diferents files, columnes i quadrants de la façana sud. | 37 |
| Figura 24. Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes), desviació estàndard (línies blaves) i histogrames on es representa com es distribueix el volum total de les diferents façanes vegetades. | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 25. Diagrama de Caixa (box plot), mitjanes (línies verdes), desviació estàndard (línies blaves) i histogrames del volum total de les façanes en els diferents sensors..... | 39 |
| Figura 26. Comparació dels volums de vegetació calculats en els diferents quadrants de la façana est segons el sensor utilitzat..... | 39 |
| Figura 27. Comparació dels volums de vegetació calculats en els diferents quadrants de la façana oest segons el sensor utilitzat. | 40 |
| Figura 28. Comparació dels volums de vegetació calculats en els diferents quadrants de la façana sud segons el sensor utilitzat..... | 40 |
| Figura 29. Ajust del model lineal que relaciona el volum de vegetació entre sensors..... | 41 |
| Figura 30. Ajust del model lineal entre el volum de vegetació i el LAI mesurat amb el ceptòmetre el 2015 dels quadrants 1, 3, 4, 6, 7 i 9 de la façana est..... | 42 |
| Figura 31. Ajust del model lineal entre el volum de vegetació i el LAI mesurat amb el ceptòmetre el 2015 dels quadrants 1, 3, 4, 6, 7 i 9 de la façana oest. | 42 |
| Figura 32. Ajust del model lineal entre el volum de vegetació i el LAI mesurat amb el ceptòmetre el 2015 dels quadrants 1, 3, 4, 6, 7 i 9 de la façana sud..... | 43 |
| Figura 33. Ajust del model lineal entre el volum de vegetació i el LAI de tots els quadrants de les columnes 1 i 3 mesurat amb el ceptòmetre el 2015. | 43 |
| Figura 34. Ajust del model lineal entre el volum de vegetació dels quadrants 2, 5 i 8 de la façana est i el LAI calculat el 2013 de forma directa..... | 44 |



INDEX DE TAULES

| | |
|--|----|
| Taula 1. Resultats de la mesura directa del LAI..... | 12 |
| Taula 2. Comparativa dels diferents sensors presents en el mercat. | 14 |
| Taula 3. Formes en les que es van classificar les cel·les..... | 31 |
| Taula 4. Volum de vegetació total, per files, per columnes i per quadrants de la façana est en m ³ | 32 |
| Taula 5. Comparació de mitjanes de volum de vegetació per cel·la de la façana est per files columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$, segons la prova de Tukey-Kramer HSD. | 33 |
| Taula 6. Volum de vegetació total, per files, columnes i per quadrants de la façana oest en m ³ | 34 |
| Taula 7. Comparació de mitjanes de volum de vegetació per cel·la de la façana oest per files columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$, segons la prova de Tukey-Kramer HSD. | 35 |
| Taula 8. Volum de vegetació total, per files, columnes i per quadrants de la façana sud en m ³ | 36 |
| Taula 9. Comparació de mitjanes de volum de vegetació per cel·la de la façana est per files columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$, segons la prova de Tukey-Kramer HSD. | 37 |
| Taula 10. Comparació de mitjanes de volum de vegetació per cel·la per façanes. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$, segons la prova de Tukey-Kramer HSD. | 38 |
| Taula 11. Volum de vegetació del quadrant 5 i 8, distància mitjana de les cel·les del quadrant respecte la paret del cub, temperatura màxima en la paret del cub de referència, temperatura màxima en la paret del cub estudiat i mitjana de la diferència de temperatura entre el cub de referència i el cub estudiat en un període de 13 dies..... | 45 |



1 INTRODUCCIÓ

En els darrers anys, la demanda energètica ha augmentat dràsticament i seguirà fent-ho en un futur pròxim. Això entre altres coses denota que l'aprofitament que se'n fa no és del tot eficient. Si bé, segons estudis realitzats, és cert que s'ha produït una disminució en el consum energètic en el sector industrial, conseqüència de les millores tècniques adoptades, en els sectors residencials i comercials s'ha experimentat un creixement preocupant.

Tothom és conscient del moment crític que s'està vivint a escala global referent al canvi climàtic i alguns sectors de la societat han començat a donar suport a iniciatives que pretenen minimitzar des de diferents vessants l'efecte que aquest pugui tenir, reduint un consum desmesurat que va en augment.

Una d'aquestes iniciatives, dins de la qual s'hi intentarà fer una petita aportació respon al nom d'arquitectura sostenible, terme que respon a la unió entre arquitectura i medi ambient. Aquesta unió es veu reflectida en la utilització, cada dia més palpable, de criteris sostenibles en el disseny, on els objectius prioritaris responen a la utilització de sistemes passius per a la disminució del consum energètic així com el tancament de cicles materials. Inclou dins d'aquests objectius, l'aportació de nous sistemes desenvolupats seguint la idea del concepte d'arquitectura sostenible, on es permet una integració real entre les construccions i el medi ambient.

Altres paràmetres que l'arquitectura sostenible té en compte són punts com les condicions climàtiques, hidrogràfiques, l'ecosistema que regeix en l'entorn i també però no menys important la implementació de fonts d'energia sostenible.

Tot i això, és conegut que existeixen altres vessants, algunes d'elles molt més puristes quant a la idea principal, sostenibilitat. L'arquitectura d'energia zero, concepte conegut i explotat des de fa anys no és fins ara que comença a guanyar popularitat. Respon a un perfil més estricte, on l'objectiu radica en la construcció d'edificacions amb un consum energètic anual proper al 0 o fins i tot negatiu. L'obtenció d'aquests resultats s'aconsegueixen implementant la mateixa metodologia que en el concepte anterior, tot i que portant cadascun d'aquests punts fins a l'extrem per extraure tot el potencial que poden aportar.

1.1 Arquitectura vegetada en façanes

Un dels molts sistemes, el qual es desenvoluparà aquí, és el de la vegetació integrada en les edificacions que dit d'una altra manera respon al nom d'arquitectura vegetada. Avui dia, la vegetació integrada en l'entorn construït, té una utilització que va més enllà de l'estètica i que respon a motius ecològics, funcionals, d'habitabilitat, econòmics, etc. (1).

Per tant, els estudis que aportin diferents punts de vista i processos per a una implementació d'aquesta són estrictament necessaris per a la seva proliferació i difusió. Es conegut que certs sistemes que s'implementen en aquests tipus d'arquitectura, com els sistemes d'integració vegetada, resulten poc freqüents degut a la creença dels elevats costos d'instal·lació, de la incompatibilitat que un element viu presenta per mantenir una sèrie de



característiques de manera uniforme al llarg del temps, així com de l'aspecte que presentaran les façanes dels edificis.

Avui en dia, són molts els estudis que relacionen la presència d'aquests elements en el disseny d'edificis amb l'aportació de serveis a l'ecosistema urbà (1).

1.1.1 Beneficis de la vegetació present en façanes

En aquesta secció s'exposaran una sèrie de punts pels quals la integració de vegetació en façanes atribueix certs beneficis al conjunt estructural on el principal es la utilització d'aquests com a sistemes passius per a l'estalvi energètic. Aquests són els principals avantatges de la vegetació de façanes en edificis:

- Regulació tèrmica :

Les zones urbanitzades es conegut que presenten temperatures mitjanes més elevades que la dels camps circumdants. L'augment de la vegetació en zones calentes de la ciutat proporciona refrigeració en zones d'aire atrapat així com la reducció de la calor reflectida. Per altra banda, es capaç de reduir la velocitat del vent i modificar el clima de l'espai intermedi ubicat entre la vegetació i l'estructura.

- Aïllament acústic :

Les superfícies vegetades presenten una baixa reflectivitat acústica i altes propietats d'absorció. El soroll ambiental es veu atenuat entre uns valors de 2 a 5 db proporcionant unes millors condicions d'habitabilitat.

- Purificació de l'aire:

Durant el dia, les plantes extreuen diòxid de carboni, monòxid de carboni i altres toxines de l'aire durant el procés de la fotosíntesi cosa que suposa una reducció significativa dels nivells de CO₂ en zones urbanes vegetades.

- Gestió de l'aigua de pluja:

La massa vegetada pot reduir la gestió de les aigües pluvials. La utilitat d'aquest punt és més rellevant en zones antigues on els sistemes que desaignen són ineficients, permetent la regulació i l'aprofitament en benefici propi.

- Augment de la biodiversitat:

La implementació de diverses varietats de plantes contribueix a l'augment de la diversitat en l'entorn urbà. Això es manifesta no tan sols per l'augment del nombre d'espècies vegetals presents, sinó també pel suport que proveeixen, de refugi i aliment, per altres espècies animals com insectes i aus.

- Salut i benestar:

La vegetació presenta un impacte psicològic positiu, essent una estratègia fonamental en la cura de malalties relacionades amb l'estrès i estils de vida urbans desconnectats de la natura. A més a més, contribueix a una major productivitat en els llocs de treball.



Per les múltiples avantatges presents en aquests tipus de sistemes, les investigacions estan enfocant els esforços en l'estudi d'aquests com a sistemes passius d'estalvi energètic. Estudis previs han conclòs que els recobriments vegetals en edificis depenent de l'espècie instaurada permeten unes reduccions en consum energètic del 33% al 59% en estacions càlides (2). Altrament, s'ha enregistrat en aquests mateixos estudis una absorció i per tant una reducció de la temperatura interna de les edificacions on s'han realitzat els assajos d'entre 4,5 a 16,5 °C graus depenent de l'orientació de la paret.

Tot i aquests resultats, és conegut que al ser un organisme viu, aquests resultats no es poden generalitzar al igual que es fa amb aïllants convencionals on, independentment de les condicions climàtiques, els resultats que obtinguts seran sempre els mateixos.

L'estudi que es presenta en aquest treball respon a la necessitat de buscar mètodes per mesurar de forma més acurada l'eficiència energètica resultant d'aplicar façanes vegetals. D'altra banda, que aquest mètodes de mesura han de ser capaços de proporcionar resultats instantanis en diferents instal·lacions i condicions climàtiques. En aquest treball es parteix de la hipòtesis que la densitat de fullatge de la façana vegetal, caracteritzada per l'índex d'àrea foliar (LAI o *Leaf Area Index en anglès*), és un paràmetre que es pot relacionar amb l'estalvi energètic que es busca. Per aquest motiu, cal trobar formes de mesura de la densitat del fullatge de forma fàcil i precisa i establir una vinculació a l'estalvi proporcionat.

1.2 Agricultura de precisió i caracterització de la vegetació

L'objectiu de l'agricultura de precisió (AP) resideix en maximitzar la producció agrícola, donant resposta a l'increment de necessitats alimentàries degut a una població en creixement, preservant simultàniament el medi ambient i optimitzant els recursos disponibles.

Aquest propòsit, ha generat nombrosos estudis en els quals s'han implementat les tecnologies més innovadores fins al moment, com sensors ultrasònics i de base fotònica, per tal d'assolir els objectius esmentats anteriorment. D'aquests estudis, hom n'ha adquirit una sèrie de procediments molt útils per al propòsit d'aquest treball que aquí es presenta. Estudis, realitzats per la Universitat de Lleida, on s'han centrat en dues metodologies, la basada en mapes digitals d'informació i la basada en sensors i en temps real.

L'AP basada en mapes digitals d'informació, es pot resumir com un procés de dues etapes. En la primera part es fa un presa de dades de la parcel·la a analitzar i de la variabilitat espacial (clima, topografia, organismes,...) per tal d'obtenir un mapa anomenat mapa d'actuació. Mitjançant la col·laboració d'aquest últim amb un sistema de georeferenciació i els aparells d'actuació pertinents, s'aplicarà en major o menor mesura l'acció que es vulgui dur a terme en el terreny per tal d'optimitzar les operacions requerides.

Per contra, l'AP basada en sensors i temps real, esdevé un procés en el qual no s'utilitzen sistemes de georeferenciació ja que, com el nom indica, es fa la presa de decisió i actuació en temps real a mesura que s'analitza el terreny (3).

Els sensors de proximitat entren en escena com a instruments capaços de capturar de forma puntual els valors de l'índex de vegetació d'una planta o part d'aquesta així com la



caracterització dels cultius arboris. Aquests sensors, permeten obtenir models tridimensionals de les plantacions a partir de la mesura de les distàncies del sensor a la vegetació. Els estudis realitzats pel GRAP (Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió) s'han centrat en la caracterització de plantacions per mitja d'aquests sensors, on han passat de mesurar arbres individualment a poder caracteritzar files i parcel·les en 3D. D'aquests estudis, hom n'ha extret punts de partida per al projecte dut a terme en aquest treball.

1.3 Antecedents de recerca

1.3.1 Importància del LAI

El paràmetre més utilitzat per a caracteritzar la massa de fulla d'una planta és el LAI. Tradicionalment, el concepte de LAI ha estat utilitzat en l'agricultura i l'ecologia per a mesurar el desenvolupament de collites, per a fer comparacions entre plantes i per a planificar el reg durant el desenvolupament de la collita (4).

Tot i que alguns autors anteriors han utilitzat el concepte de LAI amb l'objectiu de caracteritzar el potencial dels sistemes de vegetació verticals (façanes verdes) com una eina passiva per estalviar energia, després d'una revisió de literatura, s'ha detectat una manca de coneixement sobre el concepte del LAI aplicat a aquest propòsit. Així, assumptes clau com la manera de mesurar el LAI en els VGS (façanes vegetades o *vertical greenery systems en anglès*), la relació entre el LAI i els estalvis d'energia proporcionats per la façana verda no està encara resolt, fet que justifica realitzar recerca més profunda en aquesta direcció.

Els paràgrafs següents resumeixen els descobriments principals dels escassos autors anteriors que han aplicat el concepte del LAI als VGS.

Wolter et al. (2009) va dissenyar una façana experimental de doble pell de vegetació, feta amb un suport d'enreixat d'acer i heura (*Hereda helix*) per tal d'estudiar el LAI en les façanes verdes. Segons aquests autors, en el cas dels sistemes verticals de vegetació, el LAI descriu una relació entre l'àrea de fulla i els metres quadrats de façana en comptes de la relació entre l'àrea de fulla i els metres quadrats de sòl com de costum p. ex. per l'aplicació en cobertes vegetals. A més, és necessari tenir en compte el fet que en una façana verda els valors del LAI canvien amb l'alçada. Tot i que l'estudi de Wolter no considera els beneficis tèrmics de les façanes verdes, com que el LAI té una influència directa en la densitat de fullatge, aquest valor pot ser enllaçat al comportament tèrmic de sistemes verds. La mitjana de LAI mesurada a cada mostra al final del període del test va ser entre 7 (a l'est) i 8.51 (al sud). Aquests índexs d'àrea de la fulla són equivalents o fins i tot més alts que aquelles façanes convencionals d'heura (2.6–7.7) (5).

Wong et al. (2009) va dur a terme un interessant estudi sobre els efectes dels VGS en la temperatura i el consum d'energia d'edificis. Amb aquest propòsit, els autors van intentar establir una correlació entre el LAI i el coeficient d'ombra (la proporció entre la radiació solar sota la planta i la paret) basat en les mesures dutes a terme en un muntatge experimental en el qual es van comparar vuit VGS diferents. Tot i que es va trobar una correlació entre aquests dos paràmetres, no poden ser generalitzats ni tampoc es poden considerar concloents, perquè



les mesures fetes van ser poques i en sistemes de construcció molt diferents (alguns d'ells eren façanes verdes i altres eren parets verdes). La tendència general va ser l'esperada, per exemple, una radiació solar baixa a sota la planta significa que la planta ombreja la paret eficaçment. En aquest estudi, tot i que es descriu l'equipament utilitzat per mesurar el LAI i el coeficient d'ombra (radiació solar), no s'especifica la metodologia ni la veracitat de la dades subministrades (6).

Ip et al. (2010), va proposar un coeficient que intentava caracteritzar l'efecte de l'ombra d'una planta d'enfiladissa sobre el seu creixement anual i cicle de marciment. L'estudi es va basar en dades d'un experiment conduït durant 2003 i 2004. En aquell experiment, una façana verda de doble pell feta amb una malla metàl·lica i una parra verge (*Parthenocissus quinquefolia*) es va col·locar en una finestra d'un edifici d'oficines situat a Brighton (Regne Unit). Una contribució molt interessant d'aquest estudi és l'esforç per caracteritzar l'efecte d'ombra d'una façana verda de doble pell. Amb aquest objectiu, es van dur a terme fins a 2000 mesures sota la façana verda, en referència a la radiació rebuda davant de la façana. En aquest experiment, les mesures per la radiació solar es van dur a terme amb el solarímetre en posició vertical, fet que, segons els autors, implica la necessitat de fer correccions en els càlculs per tal de considerar només el component horitzontal de la radiació que és perpendicular a la façana (7).

Susurova Et al. (2013) va definir un model matemàtic per caracteritzar els efectes tèrmics de les plantes sobre la transferència de calor a través de les façanes fetes amb materials de construcció. La densitat de fulla, caracteritzada pel LAI, apareix entre els diversos paràmetres utilitzats pel simulacre, sent un dels més influents reduint la temperatura a la superfície de la paret de l'edifici. Tanmateix, en aquest estudi, el LAI es va calcular de manera aproximada mesurant l'àrea d'una sola fulla típica i tenint en compte l'àrea d'heura en una Fotografia d'una façana verda tradicional sota estudi (8).

Scarpa Et al. (2014) va proposar un model matemàtic sobre el comportament energètic de les parets vives. Un altre cop, el LAI va ser un paràmetre important a considerar en el model teòric. En aquest estudi els dos valors utilitzats pel LAI van ser de 3 en una paret viva feta amb diferents espècies d'arbust i 5 per una paret viva que utilitza herba com a vegetació, sorprenentment més alt que el primer. Aquests valors de LAI venen d'un estudi anterior conduït pels autors, els quals es van obtenir mesurant el LAI sota els arbusts col·locats en posició horitzontal, en el viver (9).

D'aquesta revisió de la literatura pot ser conclòs que el LAI és un paràmetre clau per caracteritzar la densitat de fullatge i consegüentment el comportament tèrmic dels VGS i especialment de les façanes verdes, a causa de la seva gran influència en l'efecte d'ombra. No obstant això, hi ha una manca no només de dades útils d'aquest paràmetre, sinó també de la metodologia adequada per mesurar el LAI per aquests propòsits. Així, al llarg d'aquests anys d'estudis no s'ha establert una metodologia comuna per mesurar i utilitzar el LAI en els VGS. A més a més, el LAI de les diferents espècies utilitzades pels VGS, la influència de clima en el desenvolupament d'aquestes espècies i consegüentment en valors de LAI, les variacions de LAI segons l'alçada, són qüestions encara per contestar. Tenir valors reals de LAI per plantes



diferents en climes diferents, i enllaçar aquests valors a estalvis d'energia, pot ser informació adequada per fer front a les necessitats de disseny durant la fase de projecte de l'edifici.

Els actuals estudis tenen com a objectiu l'estudi del potencial dels VGS com sistemes passius per l'estalvi d'energia en edificis, sent un dels focus principals mesurar la influència de la densitat de fulla, mitjançant el valor de LAI, en el comportament tèrmic de tot el sistema.

Ja que aquesta densitat de fulla depèn de la tipologia de VGS, del tipus de planta, així com de la seva etapa de desenvolupament i de les condicions climàtiques, és necessari d'establir metodologies de treball senzilles i generalitzables, per tal de facilitar la participació i la comparació de dades dels estudis fets per tot el món.

En una primera fase d'aquesta recerca, es va controlar al llarg d'un any sencer una façana verda de doble pell situada a les instal·lacions de Puigverd, a prop de Lleida (Espanya), sota el clima continental mediterrani (Figura 1). La façana verda consisteix en un suport d'acer d'enreixat modular amb plantes enfiladisses de la Glicina (*Wisteria sinensis*). Entenent el factor de transmissió de llum de la façana verda de doble pell com la proporció entre la quantitat de llum de l'espai intermedi i la quantitat de llum de l'exterior, aquest valor varia d'entre un 0,04 al juliol, a un 0,37 a l'abril, durant l'estació amb el fullatge plenament desenvolupat. La temperatura de la superfície de la paret exterior del cub darrere d'una àrea coberta va ser 5,5°C més baixa que en una àrea exposada. Aquesta diferència va ser més alta a l'agost i al setembre, assolint valors màxims de 15.2°C la façana Sud-Oest al Setembre (10).

A més a més, en un altre estudi experimental, es va determinar la capacitat de transmissió de quatre espècies de plantes diferents ben adaptades al clima mediterrani continental mitjançant una experimentació senzilla. Les espècies escollides van ser l'heura (*Hedera helix*) i el lligabosc (*Lonicera japonica*), com a plantes perennes, i la parra verge (*Parthenocissus quinquefolia*) i les Clematis (*Clematis* sp.), com a plantes caducifòlies. Els resultats d'aquest experiment van mostrar uns valors de factor de transmissió de llum de 0,15 per la parra verge, 0,18 pel lligabosc, 0,14 per les Clematides i 0,20 per l'heura. Aquests valors són comparables als millors valors del factor d'ombra que es poden obtenir utilitzant les barreres artificials per l'orientació Sud que es proposen en el Codi Tècnic de l'Edificació (CTE). Per tal de mesurar els estalvis d'energia associats a aquest efecte d'ombra, es va moure la façana verda formada per aquestes quatre espècies a un cub experimental en el que es va confirmar la gran capacitat de la façana verda per interceptar la radiació solar, amb reduccions de la temperatura de la superfície de paret exterior de fins a 14 °C al juliol (11).

Tenint en compte aquestes positives experiències prèvies, i en vista del potencial que tenen les façanes verdes de doble pell per generar ombra als edificis, es va construir un nou cub experimental el 2012 amb façanes vegetades cobrint les parets est, oest i sud. Es van dur a terme diferents experiments amb l'objectiu de mesurar el LAI i relacionar-lo amb l'efecte ombra i amb els estalvis energètics que se'n deriven.



Figura 1. Instal·lacions experimentals de Puigverd de Lleida.

1.3.2 Descripció de les mesures del LAI

El LAI es pot mesurar amb metodologies directes o indirectes. El mètode directe, que és el més acurat per mesurar el LAI, implica collir totes les fulles del sistema, corresponents a un metre quadrat de superfície, i mesurar l'àrea de cada fulla. Pel contrari, els mètodes indirectes es basen en la mesura de paràmetres que es poden relacionar directament amb el LAI com la quantitat de llum absorbida o reflectida per la planta.

Per caracteritzar la densitat de les fulles de la façana verda de doble pell de l'estudi i per trobar una relació entre aquesta densitat foliar i l'estalvi d'energia aconseguit a causa de l'efecte d'ombra, es van dur a terme diferents accions.

Les primeres accions van tenir lloc durant l'estiu de 2013. D'una banda, es va mesurar a diferents parts de la façana la intercepció de la radiació solar deguda a les plantes, amb l'objectiu de caracteritzar-la per orientacions i altures. D'altra banda, es va fer una mesura directa del LAI, és a dir destructiva, a la façana est, la més representativa en el moment de l'estudi ja que era la que estava més desenvolupada. En un segon període, durant l'estiu de 2015, es va realitzar la mesura indirecta del LAI mitjançant un ceptòmetre en les façanes est, sud i oest (12).

1.3.2.1 Mesura directa del LAI (2013)

Per tal de mesurar directament el LAI d'aquesta façana verda utilitzant un mètode destructiu es van recollir totes les fulles dels tres metres quadrats centrals de la façana Est. Es va mesurar l'àrea de totes les fulles individualment i després es va calcular l'àrea total de fulla per metre quadrat donant els resultats de la Taula 1.

Taula 1. Resultats de la mesura directa del LAI

| | Nombre de fulles | Àrea mitjana de fulla (cm ²) | Àrea de fulla mesurada (cm ²) | LAI |
|-------------------|------------------|---|--|-----|
| Quadrant superior | 1.387 | 15,08 | 20.914,64 | 2,1 |
| Quadrant central | 1.224 | 26,29 | 32.185,04 | 3,2 |
| Quadrant inferior | 994 | 39,6 | 39.283,75 | 3,9 |



Figura 2. Visualització del procés destructiu de la mesura del LAI (d'esquerra a dreta).

1.3.2.2 Mesura indirecta del LAI (2015)

A l'estiu de 2015, amb la façana verda en perfecte estat, es va mesurar indirectament el LAI utilitzant un ceptòmetre Sunfleck PAR (*photosynthetically active radiation en anglès*) (Figura 3). Amb l'objectiu de caracteritzar el LAI per orientació (Est, Sud i Oest) i per a diferents nivells d'alçada (superior, central i inferior), es van realitzar un total de 10 repeticions de lectura darrere de la façana verda, en sis punts diferents per orientació d'acord amb l'esquema de la Figura 3. A més, també es va fer la lectura PAR a l'exterior de la façana verda. Amb els valors d'aquestes lectures davant i darrere de la vegetació, es va poder calcular el LAI. (Figura 5)



Figura 3. Mesures fetes amb el ceptòmetre Sunfleck PAR durant un dia ennuvolat d'estiu de 2015.

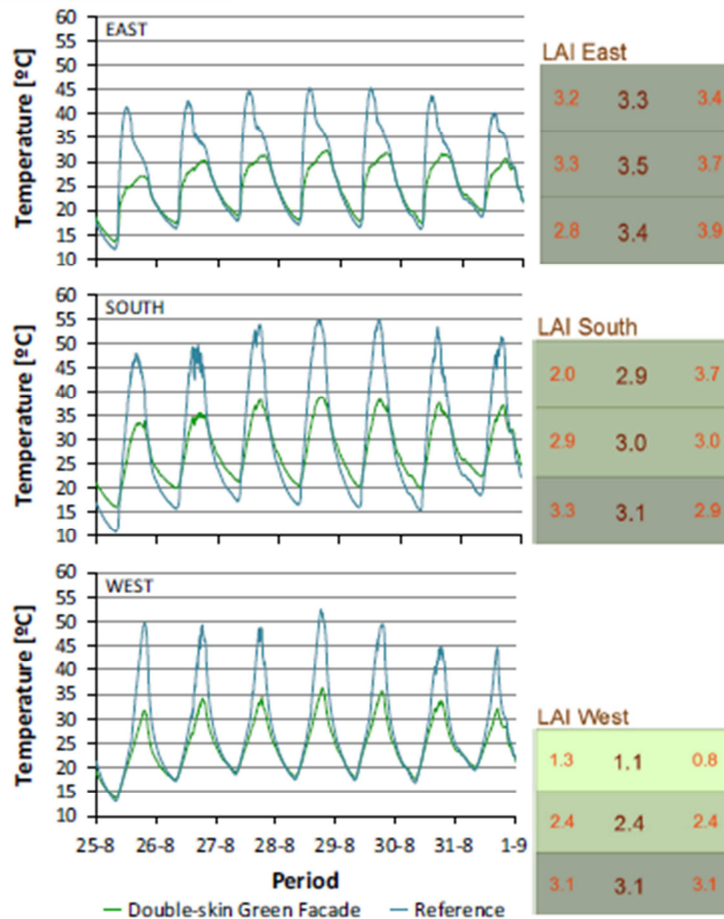


Figura 4. Resultats de la mesura indirecta del LAI . Els resultats de la columna central es van obtenir fent la mitjana entre els dos valors obtinguts en el mateix nivell.

1.3.3 Comparativa entre sensors

Un cop va sorgir la idea d'aquest treball, es va dur a terme una recerca sobre els tipus de sensors que hi ha al mercat amb els quals es podia realitzar l'escaneig de les façanes. A la Taula 2, es mostren els sensors amb capacitat per realitzar aquestes funcions i els avantatges i desavantatges que presenten (13). Finalment, la presa de dades es va dur a terme amb els sensors Kinect2 i LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Els arxius escanejats amb aquest últim tipus de sensor, el LiDAR, són els utilitzats en aquest treball.

Taula 2. Comparativa dels diferents sensors presents en el mercat.

| Tipus de sensor | Principi físic i característiques del sensor | Avantatges | Desavantatges |
|-----------------|---|---|---|
| Sistemes radar | <ul style="list-style-type: none"> - Utilitza la radiació electromagnètica (EM) en el rang de microones. - Esta basat en la mesura del temps transcorregut o del desplaçament de fase del pol EM entre l'emissor i l'objectiu | <ul style="list-style-type: none"> - Relativament independent de les condicions atmosfèriques. - Mesura les diferències en l'estructura del dossier a nivells a gran escala | <ul style="list-style-type: none"> - Resolució espacial deficient per aplicacions en l'agricultura. - Mesura precisa de les característiques 3D del dossier, com altura i volum, el model espacial 3d del arbres roman inviable pel moment. |

| | | | |
|-------------------|---|---|--|
| Mètode fotogràfic | <ul style="list-style-type: none"> - Les càmeres d'imatge digital, reben la llum de la superfície de l'objecte i la converteixen en una senyal elèctrica utilitzant un dispositiu d'acoblament de carrega (CCD) o un semiconductor complementari d'òxid de metall (CMOS) - La fotografia hemisfèrica digital utilitza càmeres digitals amb objectius de ull de peix. | <ul style="list-style-type: none"> - Les càmeres digitals son un instrument de baix cost fàcil d'utilitzar. - Algunes característiques de les plantes tals com alçada, volum, índex d'àrea foliar (LAI) i l'índex d'aglomeració foliar pot ser estimat amb una precisió raonable. | <ul style="list-style-type: none"> - La avaluació de la geometria de la planta es un procés laboriós i lent. - No es útil per a aplicacions en temps real 3D. - Es requereix un calibratge prèvia de la càmera. - El model 3D de la planta no s'obté directament però si amb una post producció posterior amb algoritmes. |
| Sensor llum | <ul style="list-style-type: none"> - Es basen en el seguiment de les finestres d'ombra d'un arbre a través d'un sistema de xarxa de sensors de llum al sòl - Utilitza tècniques de tomografia per obtenir característiques dels arbres analitzant les diferents imatges d'ombra adquirides en els diverses posicions del sol. | <ul style="list-style-type: none"> - Sistema a mida de cost reduït. - L'escàner es pot ajustar a diferents estands. - Característiques geomètriques del dosser com mida, forma i secció exposada al sol i la fracció d'ombra i àrea del dosser il·luminada per el sol es pot obtenir | <ul style="list-style-type: none"> - Restringit en dies solejat, amb un cel clar i poc vent. - La presa de dades requereix de molt temps. - El model 3D de les plantes no s'obté directament però si per un post processat posterior. |
| Estereovisió | <ul style="list-style-type: none"> - Proporciona una imatge 3D combinant dos imatges monoculars de camp preses simultàniament utilitzant una càmera digital binocular. - El còmput d'algoritmes es necessari per convertir les coordenades dels objectes presos per la càmera en coordenades del mon real. - El resultat de les mesures es un núvol de punts 3D amb un grau de detall proporcional a la resolució de les imatges adquirides. | <ul style="list-style-type: none"> - Es la tècnica que proporciona les imatges 3D de plantes mes reals. Molt similars a la visió de l'ull humà. - Mesura directament l'estructura vegetal 3D incloent paràmetres físics que son importants per al control de la producció com el volum i dimensió. - Es pot aportar informació de la anàlisis espectral. - Suporta la adquisició d'imatges 3D del sistema d'informació geogràfica (BIS) | <ul style="list-style-type: none"> - Ofereix menys precisió que els sistemes làser i necessita d'un ajust apropiat. - Perd efectivitat sota certes condicions climatològiques com per exemple en canvis lumínics i requereix de millores si s'ha d'aplicar en àrees majors. - Quan es processen múltiples imatges a la vegada, el pes de les dades augmenta considerablement complicant el maneig i el guardat de la informació 3D i requerint processament llarg. El problema empitjora quan es requereix de processament real. |
| Sensor ultrasònic | <ul style="list-style-type: none"> - Utilitza la transmissió d'ones sonores en l'aire a freqüències inaudible per a l'home. - Es basa en determinar el temps que tarda l'ona ultrasònica des del punt d'emissió fins a l'objecte de detecció | <ul style="list-style-type: none"> - La robustesa i el baix preu el fan adequat per a l'agricultura de precisió. - Relativament fàcil d'implementar. | <ul style="list-style-type: none"> - L'ús de moltes unitats per cobrir un terreny agrícola es necessari. - El seu inconvenient principal és el gran angle de divergència de les bigues d'ones ultrasòniques. Això limita la resolució i la precisió de les mesures realitzades. |
| Sensor LiDAR | <ul style="list-style-type: none"> - Es basa en la mesura de la distància des d'un emissor làser fins a un objecte o superfície utilitzant un pols de feix làser. - S'utilitzen dos mètodes de mesura: <ul style="list-style-type: none"> (i) El temps de vol LiDAR, mesura el temps en que un pols làser tarda en viatjar entre el sensor i l'objecte. (ii) Mesurament de desplaçament de fase LiDAR, on mesures la diferència de fase entre els raig làser incidents i reflectits. - El sistema LiDAR emet raig ultraviolats (UV), visibles (VIS) o propera a la infraroja (NIR). | <ul style="list-style-type: none"> - Alta velocitat de mesura. Permet obtenir punts de núvols 3D ràpidament que, mitjançant l'aplicació d'algoritmes apropiats, fa possible la reconstrucció digital dels objectes de forma precisa. - Alta precisió. Això permet quantificar variacions espacials i temporals, que es un aspecte important en l'estructura vegetada i un avanç significatiu pel que fa a altres mètodes. - Els sistemes LiDAR, poden generar imatges 3D digitalitzades de cultius amb suficient precisió per a la majoria d'aplicacions agrícoles d'on es pot obtenir l'alçada, amplada, volum, índex d'àrea de fulla i la densitat d'àrea de fulla. - Comparat amb els sistemes 3D LiDAR convencionals, els 3D Flash LiDAR, tenen un sistema de mesura mes ràpid, son mes petit i més barats tot mantenint la mateixa precisió. | <ul style="list-style-type: none"> - Limitacions en entorns de pols, boira i humitat. - L'alt cost de motoritzat 3D limiten el seu us. - L'estimació del volum es molt sensible a errors en la determinació de la distància entre el LiDAR al centre de l'objecte i en la determinació de l'angle d'orientació d'aquest. Paral·lelament, els escàners LiDAR motoritzats terrestres, han d'incloure dispositius addicionals o processos per controlar o estimar i corregir aquestes fonts d'error. - En determinades circumstàncies, la mida dels fitxers de dades pot ser considerable, complicant el maneig i guardat d'aquesta informació 3D i requerint de llargs temps de procés. El problema pot incrementar-se, quan el processament en temps real es requereix. |

| | | | |
|----------------|---|---|---|
| Sensor Kinect2 | <ul style="list-style-type: none"> - Basa el seu funcionament en la mesura de la distància des d'un emissor làser fins a objectes utilitzant una càmera de profunditat. - Incorpora una càmera RGB destinada entre altres raons a incorporar la dada de color als núvols de punts 3D augmentat el detall i millorant el processament d'aquests. | <ul style="list-style-type: none"> - Alta velocitat de mesura. Tant la captació com el processament de dades es crea de manera instantània recreant objectes precisos. - Alta precisió. Al igual que el LiDAR, permet quantificar les variacions presents en la vegetació. - La digitalització d'aquest objectes en imatges 3D, en el nostre cas de massa vegetada, a més a més de obtindrà les mateixes dades que en l'aparell anterior aporta la dada de color. - El gran avantatge, es la lectura i processament instantani i un preu amb el que cap de les eines restants pot competir. | <ul style="list-style-type: none"> - Limitacions del sensor RGB en condicions lumíniques molt elevades i del conjunt amb entorns de pols i boira. - Al realitzar fotografies i no escanejos te un rang d'actuació angular i de distància molt reduït. Per pal·liar el problema s'incorporen elements motoritzats amb sistemes i processos addicionals per a recrear i reconstruir les fotografies en una mateixa. Aquest fet requereix de llargs temps de processament. |
|----------------|---|---|---|



1.4 Objectiu

1.4.1 Objectiu general

- Trobar una metodologia la qual permeti caracteritzar i estudiar tridimensionalment un sistema vertical de vegetació.

1.4.2 Objectius parcials

- Obtenir el volum de vegetació del sistema vertical de vegetació amb un escàner làser terrestre mòbil, de forma objectiva, repetible, quantificable i econòmica.
- Establir una relació entre el volum de vegetació obtingut en el pas previ amb l'índex d'àrea foliar per contrastar la precisió del mètode utilitzat en aquest treball.
- Establir una relació entre el volum de vegetació de les façanes estudiades i les temperatures preses en un estudi previ. Així doncs, coneguda la relació entre aquest dos paràmetres també es podrà conèixer l'estalvi energètic que proporciona un sistema vertical de vegetació.
- Comparar els resultats obtinguts entre el sistema d'escaneig basat en el sensor Microsoft Kinect2 i el basat en el sensor LiDAR Hokuyo UTM30-LX-EW per tal de veure si s'obtenen resultats equivalents.



2 MATERIALS I MÈTODES

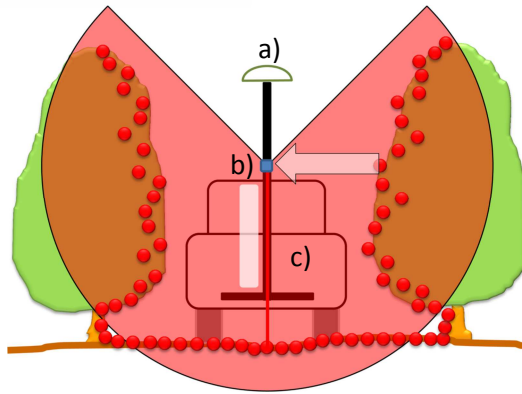
En aquest apartat es fa una explicació de les eines utilitzades per a la realització d'aquest estudi al llarg de tot el procés, tant del hardware com del software.

2.1 Hardware

Les tècniques instrumentals més utilitzades per caracteritzar les capçades dels arbres són la fotografia digital, la fotogrametria, l'estereoscòpia i el LiDAR. Els tres primers comparteixen l'ús de càmeres digitals, que es beneficien de pertànyer a un segment de productes de consum i són econòmicament accessibles. Els sistemes LiDAR es basen en una font làser que emet polsos de llum que impacten l'objecte d'interès. Al mesurar el temps transcorregut entre l'emissió del pols de llum i el retorn de la llum retrodispersada (temps de vol) o el canvi de fase, el dispositiu determina la distància a l'objecte. En els últims anys, diversos estudis han utilitzat escàners mòbils terrestres mòbils (MTLS) basats en sensors LIDAR 2D per caracteritzar cultius d'arbres en entorns agrícoles. Una de les principals limitacions dels sistemes basats en el LiDAR és la seva incapacitat de mesurar dins de les corones, a causa de la interacció entre el feix làser i els elements vegetals més externs.

2.1.1 Escàner làser terrestre mòbil

El MTLS desenvolupat per a caracteritzar les façanes verdes va integrar un sensor LiDAR 2D i un sistema GNSS1200 + (Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Suïssa) RTK-GNSS (un sistema de satèl·lits de navegació global de cinemàtica en temps real que va rebre senyals de GPS i de la constel·lació de satèl·lits Glonass). Tots dos estaven connectats a un ordinador portàtil resistent, adequat per treballar en condicions de camp. El sistema d'adquisició utilitza un programa desenvolupat en LabVIEW (National Instruments, Austin, EUA) que combina i emmagatzema les coordenades del receptor i les dades de LiDAR. El sensor utilitzat va ser un LiDAR de temps de vol UTM30-LX-EW (HOKUYO, Osaka, Japó) que té un rang de mesura de fins a 30 m. El sensor realitza 40 escaneigs per segon (40 Hz). Té capacitats de retorn múltiple i proporciona fins a tres mesuraments de distància corresponents a impactes parcials en diferents objectes per al mateix pols emès del làser. Després de processar cada senyal de retorn, el sensor determina la distància a la qual es troba l'objecte afectat pel pols de llum incident. El rang angular del sensor és de 270° i la seva resolució angular és de 0.25°. Les mesures es van obtenir en coordenades polars, és a dir, l'angle i la distància de cada mesura, prenent el centre del sensor LiDAR com a origen de les coordenades. La sortida del sensor era un conjunt de 1081 punts per escaneig corresponents als primers de retorn i una sèrie indeterminada de punts corresponents als segons i tercers retorns, sempre que existissin. El sensor es va acoblar a un perfil d'alumini per sota de l'antena del receptor RTK-GNSS, de manera que les coordenades absolutes del sensor es van registrar de forma contínua amb una freqüència de 20 Hz. El sector cec de 90° estava apuntant cap amunt, de manera que 540 feixos de làser estaven orientats al costat dret del sensor, 540 estaven orientats cap al costat esquerre, i el feix central era perpendicular a la superfície del sòl (Figura 5). Alguns dels feixos làser van impactar el terra, altres van impactar sobre la vegetació del cub estudiat o en d'altres i alguns no van impactar en res.



a) Antena GNSS-RTK

b) Sensor LiDAR

c) Vehicle de transport

Figura 5. Diagrama del sistema MTL i els seus components.

2.2 Programari

2.2.1 Adquisició de dades

L'adquisició de dades es va realitzar amb un programa elaborat amb el llenguatge de programació gràfica LabVIEW 2012 per membres del GRAP. El programa adquiria les dades del sensor LiDAR i del receptor GNSS-RTK de forma sincronitzada i les emmagatzemava en un arxiu de text.

2.2.2 Generació dels núvols de punts

A partir dels arxius de text obtinguts amb el sistema d'adquisició de dades es va fer servir un algorisme implementat en Matlab per membres del GRAP per a assignar coordenades absolutes a cadascun dels punts obtinguts.

2.2.3 Visualització i edició dels núvols de punts

El programa utilitzat per a visualitzar i editar els núvols de punts obtinguts pel MTL ha estat el CloudCompare v2.9.1. Aquest programari de codi obert, iniciat al 2003 però presentat per al seu ús el 2009, és un software de processament i edició de núvols de punts 3D. És actualitzat regularment incorporant funcionalitats noves, ja que es un projecte de codi obert independent i software lliure.

La finalitat original del programa, era la de comparar núvols de punts 3D d'alta densitat generats per escàners làser, entre ells o amb malles triangulars per tal de detectar diferències entre dues mesures d'un mateix objecte o grups d'objectes.

Això s'aconsegueix gràcies a l'aportació de diferents eines bàsiques per a l'edició i renderitzat manual. L'evolució d'aquest, també ha permès la incorporació d'algoritmes avançats de processament alguns dels quals han servit al propòsit del treball.

Les possibilitats del programa, referents a l'extracció d'informació, són bastant àmplies. Tot i això, el desconeixement d'aquesta eina i de la seva utilització per al propòsit que es tracta en aquest treball, ha comportat una àrdua feina de proves fins a trobar els resultats adequats. En apartats posteriors, s'explicaran les eines utilitzades en el processament de les façanes que han resultat útils i aquelles que al final s'han descartat perquè no donaven els resultats esperats.



2.2.4 Càlculs generals

Per a calcular els volums de vegetació es va fer servir el programa MS Excel 2010 (Microsoft, Redmont, WA, USA).

2.2.5 Tractament estadístic

Una vegada calculats els volums de vegetació per cada façana, es va procedir a comparar les mitjanes obtingudes per a determinar si hi ha diferències significatives entre elles. El tractament estadístic es va realitzar amb el programa estadístic JMP PRO 13 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

La prova que es va aplicar va ser la de Tukey-Kramer amb un nivell de significació, α , de 0,05. Es va escollir aquesta prova per ser àmpliament utilitzada en la bibliografia en àmbits similars a l'estudiat.

Les comparacions múltiples de les mitjanes permeten examinar quines mitjanes són estadísticament diferents i estimar el grau de diferència. Es pot avaluar la significació estadística de les diferències entre les mitjanes usant un conjunt d'interval de confiança, un conjunt de proves d'hipòtesis o tots dos. Els interval de confiança permeten avaluar la significació pràctica de les diferències entre les mitjanes, a més de la significació estadística. Com és habitual, la hipòtesi nul·la de no diferència entre mitjanes es rebutja si, i solament si, l'interval de confiança no conté el zero.

El mètode de Tukey s'utilitza per crear interval de confiança per a totes les diferències en parelles entre les mitjanes dels nivells dels factors mentre controla la taxa d'error per família en un nivell especificat. És important considerar la taxa d'error per família quan es fan comparacions múltiples, perquè la probabilitat de cometre un error de tipus I per a una sèrie de comparacions és major que la taxa d'error per a qualsevol comparació individual. Per contrarestar aquesta taxa d'error més elevada, el mètode de Tukey ajusta el nivell de confiança de cada interval individual perquè el nivell de confiança simultani resultant sigui igual al valor que s'especifiqui.

Es van comparar les següents mitjanes:

- Per a cada façana: per alçades, per amplades i per quadrants
- Entre façanes per cada sensor
- Entre sensors

2.3 Escaneig experimental de les façanes.

L'adquisició de les dades es va realitzar a Puigverd de Lleida el 19 de setembre de 2016. El sistema vertical de vegetació estava implementat en un cub experimental d'aquestes instal·lacions. Aquest consistia en una façana verda de doble pell on la vegetació es fa créixer per un suport d'acer d'enreixat modular (malla metàl·lica) situat a 20 cm de la paret del cub. La vegetació present en les façanes Est, oest i sud estava format per l'espècie parra verge (*Parthenocissus Tricuspidata*), planta d'una adaptació consolidada en un clima mediterrani continental com aquest (Figura 6). En el moment de la presa de dades, es suposa, que la planta

es presentava en el seu màxim esplendor i per tant en el punt òptim quant a sistema passiu per a l'estalvi energètic. També es va integrar un dispositiu en el centre de les façanes est, oest i sud del cub de referència (sense VGS) i del cub estudiat (amb VGS) per obtenir les dades de la temperatura superficial de la paret. La diferència entre les lectures del cub de referència i el cub estudiat va permetre calcular quina era la diferència de temperatura que aportava el sistema VGS.



Figura 6. Detall del sistema de suport construït el 2012 (a) i vista general del cub (b). Detall (c) i vista general (d) del sistema de vegetació plenament desenvolupat

Per l'escaneig del sistema VGS, el MTLs es va moure'l al voltant del cub de l'estudi, a una alçada de 1,7m sobre el terreny, tal com es mostra a la Figura 7 i a la Figura 8. La velocitat d'avanç de la plataforma era de 0,54 km/h (motor treballant a 10Hz), velocitat que equivalia a una separació aproximada de 0,38 cm entre escanejos. El sistema es va escanejar amb el MTLs el 19/09/2016. Per simplificar, es va considerar que cada escaneig proporcionava mesures en un pla vertical perpendicular a la direcció del desplaçament, aproximadament perpendicular a les façanes verdes.

Per contra, l'MTLs basat en el sensor Kinect2, fa la mesura en un mode estàtic, similar al procediment que segueix una càmera. Per mitjà del vehicle autònom es col·locava enfront de les tres façanes del cub per tal de realitzar 6 fotografies de cadascuna d'elles, 3 de detall a una distància d'entre 2,15 i 2,8 metre i 3 complertes a 4 metres. En el sensor Kinect2, les dades adquirides es processen per mitjà d'un software que en crea un arxiu per al seu emmagatzematge. Aquest software, permet a l'usuari seleccionar diferents FOV i freqüències d'adquisició de dades i mostra els quadres de vídeo de les escenes mesurades en RGB i IR.

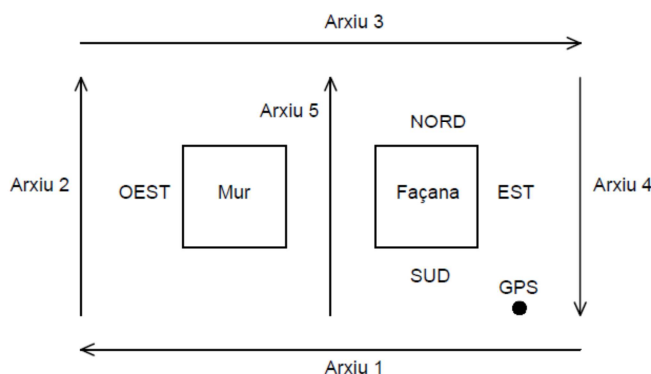


Figura 7. Esquema de les mesures realitzades amb el sensor Hokuyo al cub de l'estudi.



Figura 8. Vista del MTLS basat en el sensor LiDAR durant l'escaneig.

2.4 Caracterització geomètrica del sistema VGS

Els punts van ser transferits i emmagatzemats en coordenades polars relatives amb l'origen al centre del sensor. Les dades es van processar posteriorment. El primer pas en el processament de dades va ser transferir les coordenades absolutes projectades ETRS89 UTM 31T de l'antena del receptor al sensor LiDAR. Com que la posició del sensor era l'origen de les mesures polars, cada un dels punts mesurats es va georeferenciar en coordenades rectangulars absolutes amb una precisió aproximada de $\pm 0,05$ m (des de les especificacions: aproximadament $\pm 0,03$ m de la precisió del sensor i aproximadament $\pm 0,02$ m del receptor RTK-GNSS). Pels arxius 1 i 3, a cada arxiu d'escaneig, es va obtenir un núvol de punts d'aproximadament 6 milions de punts mentre que en els arxius 4 i 5 es van obtenir un núvol de punts d'aproximadament 3 milions punts de les façanes adjacents i del sòl. Finalment, si es fusionen els núvols de punts dels 4 arxius, s'obté un núvol de punts 3D amb el cub i el sistema VGS complet, com es mostra a la Figura 9 i a la Figura 10, format per més de 17,5 milions de punts. La gestió de dades del núvol de punts es va realitzar amb algorismes propis mentre que la visualització del núvol de punts i algunes computacions específiques es van realitzar amb el programa CloudCompare.

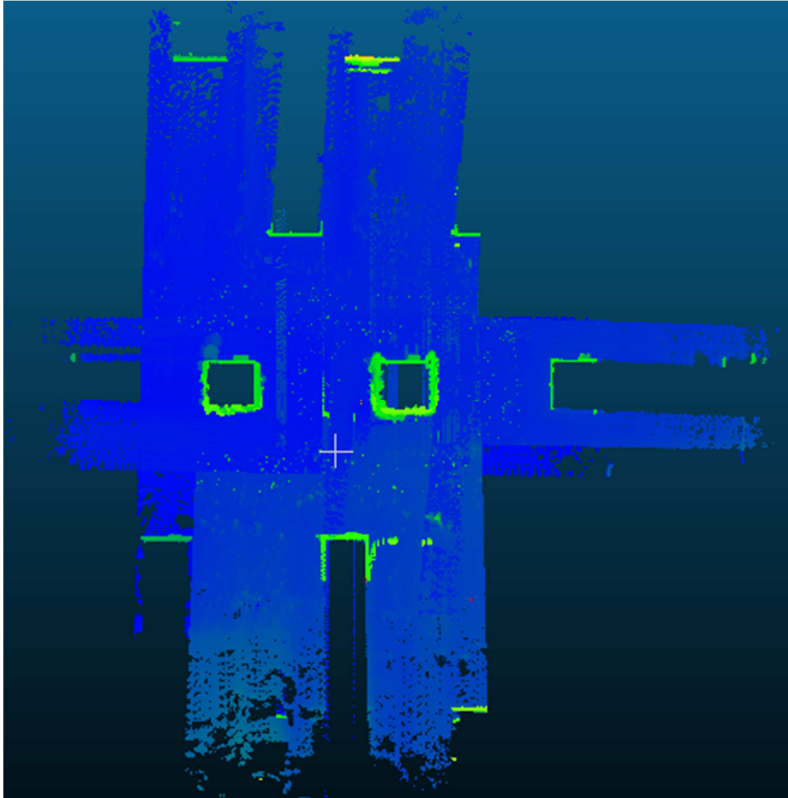


Figura 9. Vista en planta de la fusió dels 4 arxius de núvols de punts, donant color a cada punt segons la seva alçada per facilitar-ne la seva interpretació visual, sent els punts blaus al nivell de terra i els punts verds sobre les diferents façanes.

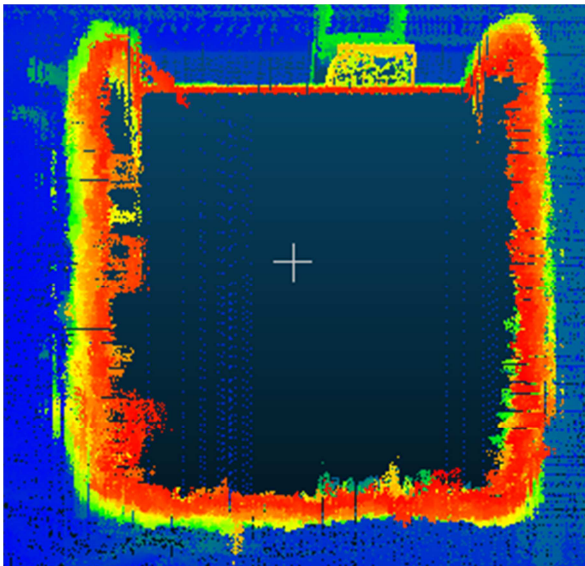


Figura 10. Vista en planta del cub estudiat, resultat de la fusió dels 4 arxius, donant color als punts segons la seva alçada; sent els punts blaus al nivell del terra i els punts vermells els més alts.



2.5 Processament dels núvols de punts

En aquest apartat s'explica el procediment seguit per a l'estudi dels núvols de punts 3D captats mitjançant l'MTLS basat en el sensor Hokuyo amb el software CloudCompare.

2.5.1 Presa de contacte amb arxius

Com s'ha explicat a l'apartat 2.1.1, l'MTLS compta amb un receptor que dona coordenades projectades UTM (Sistema de Coordenades Universal Transversal de Mercator). Aquestes coordenades es transfereixen al sensor LiDAR i, seguidament, a cadascun dels punts. D'aquesta manera, els diferents arxius ja queden perfectament georeferenciats. Aquest és un gran avantatge respecte el sensor Kinect2 i ens permet passar al següent pas molt més ràpid.

En el cas del sensor Kinect2, no es comptava amb georeferenciació i per tant les façanes del cub no van venir amb una orientació i posicionament adequat per iniciar les proves.

2.5.2 Construcció del cub

Per a poder calcular el volum de vegetació, el primer pas va ser construir un cub digital de 3 m x 3 m x 3 m a la mateixa escena que el núvol de punts. La construcció del cub simulava les parets del cub de l'estudi i actuarà com a referència per calcular la distància dels punts respecte la paret. És un pas essencial perquè aquesta distància és la que ens permetrà calcular el volum de vegetació present en el VGS.

En el cas del sensor Hokuyo aquest pas va ser particularment complicat perquè no es va col·locar cap referència que indiqués la posició real de les parets durant els escaneigs. Això va provocar que els murs s'haguessin de col·locar de forma aproximada. Tot i així es pot assegurar que els murs es van col·locar amb precisió gràcies a la paret nord, que no té vegetació, i a que les dimensions de les parets són conegudes.

Els murs es van crear amb l'eina *primitive factory*. Aquesta eina permet crear un volum sòlid de les dimensions que es desitgin. Donat que l'orientació de les parets coincideix amb els eixos de coordenades del programa, les parets un cop creades només es van haver de traslladar i no va fer falta rotar-les. La primera paret que es va crear va ser la nord, ja que al no haver vegetació davant, la paret apareix nítidament en l'arxiu. Tot seguit es van crear les parets est i oest aprofitant la cantonada que comparteixen amb la paret nord. I, finalment, es va crear la paret sud. El resultat final es pot veure a la Figura 12. Un error comés en aquest procediment i que no va sortir a la llum fins que es van comparar les façanes amb les obtingudes a través del sensor Kinect2, va ser la col·locació de les parets pel que fa a l'eix vertical (eix Z), ja que el VGS es troba per sobre del nivell de terra i per tant les parets no les podíem situar a nivell de terra perquè ens interessava tenir tota la paret darrera de la façana verda.

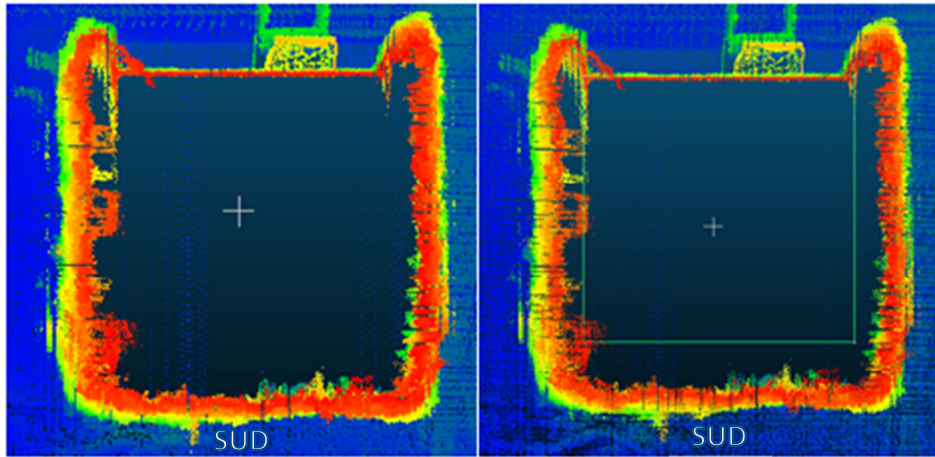


Figura 11. Vista en planta del cub sense els murs (esquerra) i amb els murs (dreta).

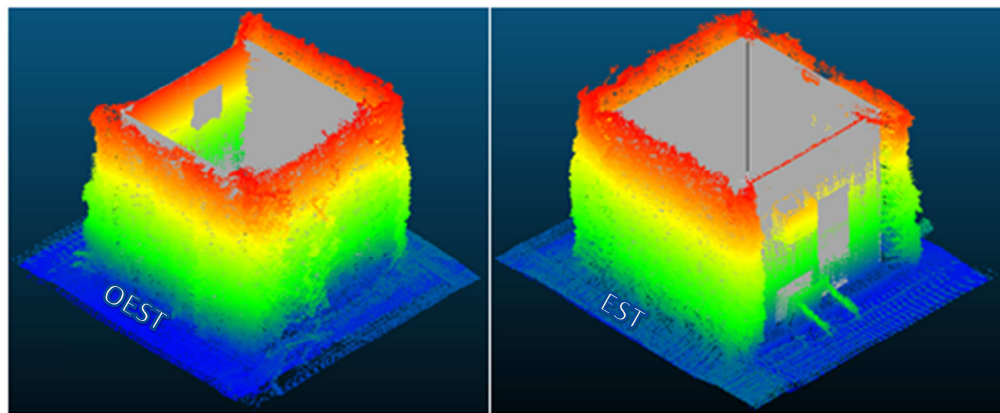


Figura 12. Resultat final de la creació dels murs en perspectiva.

2.5.3 Neteja dels murs

Amb tot el cub en un sol arxiu, es va optar per estudiar cada façana individualment. A partir d'aquest arxiu, es van crear 3 nous arxius; un per a la façana est, un per a l'oest i un per a la sud. Cada un d'aquests arxius estava format per l'arxiu que va escanejar frontalment la façana i la seva paret corresponent.

La neteja es va dur a terme en 2 passos: un primer pas on es netejava del "soroll" la façana i un segon pas on ens quedàvem només amb els punts d'interès de la façana. El programa CloudCompare ens ofereix dos eines molt útils per netejar. La primera d'elles, anomenada "SOR" (filtre atípic estadístic o *statistical outlier removal*), que computa la distància mitja de cada punt respecte dels veïns i elimina els que estiguin més lluny que N vegades la desviació estàndard. En aquest treball es va utilitzar $N=1$. En segon lloc l'eina "segment", similar a l'eina retallar però amb la diferència de què pot crear polilínies i ajusta en major mesura l'element a eliminar.

Es va decidir que els punts de la façana verda que es trobessin fora de la projecció de la paret, no es tindrien en compte pels càlculs de volum de vegetació i per tant es van eliminar. Aquesta decisió es va prendre per a que els resultats obtinguts fossin comparables amb els estudis previs duts a terme on es va estudiar la vegetació per quadrants d' 1 m^2 . De no haver eliminat aquest punts, la superfície de vegetació caracteritzada hagués estat superior.

Un cop es van netejar els punts, com es mostra en la Figura 13, l'arxiu ja està a punt per calcular la distància a la que es troben els punts respecte la façana.

2.5.4 Càlcul de les distàncies a la que es troben els punts respecte la façana

La distància de cada punta a la façana es va calcular utilitzant l'eina *Compute cloud/mesh distance*. Aquesta eina calcula la distància que hi ha entre cada punt d'un núvol de punts i una superfície i la incorpora a la informació ja present en el núvol de punts en un nou camp escalar. A més, dóna color als punts en funció d'aquesta distància, sent els vermells els més allunyats i els blaus els més propers, com es pot observar en la Figura 13. Amb aquest pas, ja es va poder tenir una primera idea de quines serien les façanes amb més vegetació però encara no s'estava en disposició de fer el càlcul del volum, perquè tot i saber la distància respecte la paret, no es sabia ben bé quina àrea donar a cada punt.

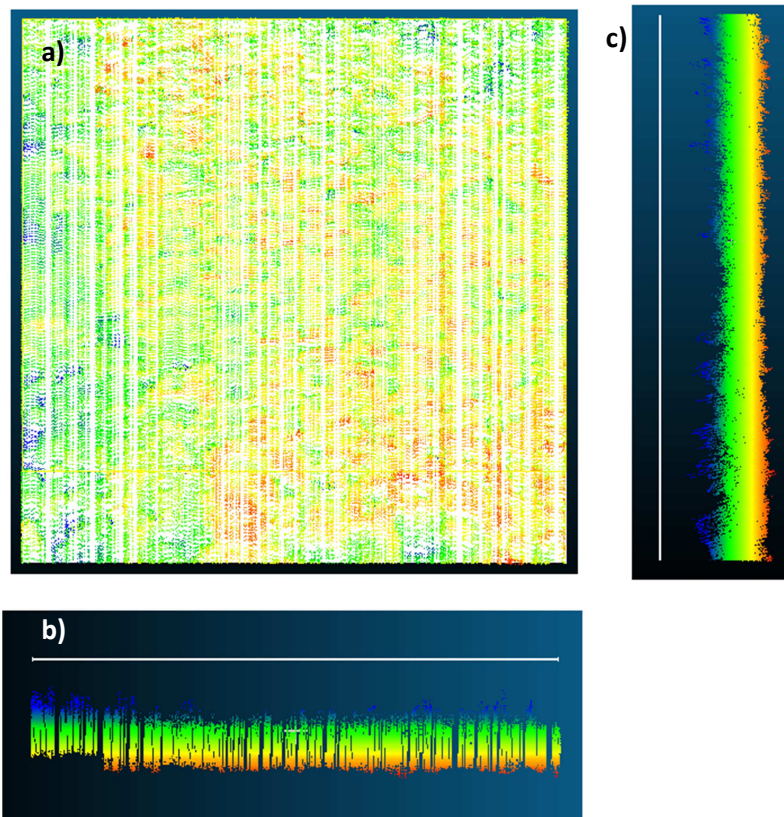


Figura 13. Vista en alçat (a), planta (b) i perfil (c) de la façana est netajada. El color dels punts indica la distància d'aquests respecte la paret sent els punts blaus els més propers a la paret i els vermells els més allunyats.

2.5.5 Rasterització de les façanes

La solució per a calcular l'àrea que representava cada punt va consistir en estudiar el núvol de punts amb una quadrícula de cel·les d'àrea coneguda, i que es podien controlar i modificar des del programa. L'eina utilitzada s'anomena *Convert a cloud to a 2D raster* i el que fa és analitzar els punts del núvol que hi ha dins d'una cel·la i crear un nou punt en el centre d'aquesta, situat a la distància que escullí l'usuari. D'aquesta manera es va obtenir un nou núvol de punts on no només es coneixia la distància dels punts respecte la paret, sinó que també es coneixia l'àrea que representa cada punt.



Per a crear aquest nou núvol de punts, el primer que demanava l'eina es que s'introdueixin les dimensions de les cel·les amb les que s'ha de dividir el núvol de punts original. Es va observar que a menor dimensió de cel·la, major precisió s'obtenia en la recollida de punts i per tant, un volum més acurat. Tot i així, es va comprovar que hi havia un límit fins al qual es podien reduir les dimensions de les cel·les fins que es generaven cel·les buides que haguessin falsejat els resultats. Deguda a la naturalesa comparativa del treball, les dimensions de les cel·les les va limitar l'MTLS basat en el sensor Hokuyo, ja que reduint les dimensions de la cel·la per sota dels 4,5 cm de costat, es generaven espais buits entre columnes de punts deguts a la velocitat d'avanç del MTLS.

Altres paràmetres a tenir en compte van ser funcions com:

- La selecció de la capa a analitzar. En el cas que ocupa el treball, la capa activa de processat va ser la generada en el càlcul de distàncies anteriors (C2M).
- La perspectiva des de quina fer l'anàlisi, donat que aquesta ha de ser frontal a l'orientació de la façana.
- La selecció de la distància on es situa el nou punt. Es va escollir situar el nou punt en la distància més allunyada respecte la paret per a treballar amb el volum de vegetació més gran.
- La introducció o no de cel·les buides al nou núvol.

Fet això, es va generar un arxiu de text que es pot obrir amb el programa Microsoft Excel i que ja contenia totes les dades necessàries per fer el càlcul del volum de cada façana.

2.6 Càlcul del volum de vegetació i classificació dels punts

Es va utilitzar el programa Microsoft Excel per a calcular el volum corresponent a cada cel·la procedent de la rasterització de les façanes estudiades i, posteriorment, classificar aquestes cel·les en el quadrant al que corresponen segons la seva posició en la façana.

Abans de poder treballar amb les dades procedents del programa CloudCompare, la primera tasca va ser identificar i separar en columnes aquestes dades. A més, cada fila representa les dades de tots els punts continguts en cada una del les cel·les resultants de la rasterització. Obtenim les següents columnes:

- A. Coordenada X
- B. Coordenada Y
- C. Coordenada Z
- D. Color R
- E. Color G
- F. Color B
- G. Distància a la que s'ha situat la cel·la
- H. Punts que hi ha a la cel·la
- I. Distància mínima a la paret
- J. Distància màxima a la paret
- K. Distància mitjana a la paret



- L. Desviació estàndard
- M. Rang de distàncies
- N. Distància de la cel·la respecte la paret

D'aquestes dades, les més interessants per aquest treball són les coordenades que s'utilitzaran per situar els punts i la distància de la cel·la respecte la paret que s'utilitzarà per calcular el volum de vegetació.

2.6.1 Càlcul del volum

Donat que les cel·les feien 4,5 cm de costat, cada cel·la representava una àrea de 20,25cm². Sabent l'àrea de la cel·la i la distància de la cel·la respecte la paret es calcula el volum de vegetació que hi ha comprés en aquest prisma. Per calcular el volum total de cada façana es sumen els volums de les cel·les que formen la façana. No es tracta d'un càlcul directe ja que seria un error considerar la vegetació com un bloc massís fins a arribar a la paret donat que la malla metàl·lica per on creix la vegetació està situada a 20 cm de la paret. Tampoc es pot restar el volum que hi ha entre la paret i la malla perquè la vegetació estudiada no només creix cap a fora, sinó que també creix cap a dins. Després de descartar altres opcions es considera que el creixement de la vegetació cap a dins és proporcional al creixement exterior, de forma que el punt més allunyat de la paret correspon també al punt més proper, estimat a 10 cm de la paret. D'aquesta manera, i tenint en compte la geometria de la instal·lació, s'ha proposat la següent forma de fer el càlcul del volum de vegetació d'una cel·la:

$$V_i = d_i' \cdot a^2 \quad (1)$$

on:

V_i : volum de vegetació d'una cel·la i [m³]

d_i' : distància de qualsevol cel·la i a la paret corregida[m]

a : longitud del costat de la cel·la (0,045 m)

2.6.1.1 Càlcul de la distància corregida

La correcció consisteix en afegir un 20% a la distància de la vegetació a la malla. Es va fixar aquest criteri després de considerar que al punt màxim (66 cm) li corresponien 10 cm de penetració de la vegetació a la malla. Es pot veure el procediment seguit a les equacions següents.

d_i : distància de qualsevol cel·la i a la paret[m]

d_{max} : distància màxima d'una cel·la d_i a la paret[m]

d_r : distància de la malla metàl·lica a la paret (0,2 m)

d_p : distància de penetració de la vegetació de la malla a la paret[m]

$$d_i' = (d_i - d_r) + \frac{d_p \cdot (d_i - d_r)}{(d_{max} - d_r)} \quad (2)$$

Per al cas de $d_{max} = 0,66 \Rightarrow$

$$\begin{aligned} d_i' &= (d_i - 0,2) + \frac{0,1 \cdot (d_i - 0,2)}{(0,66 - 0,2)} = (d_i - 0,2) + \frac{0,1 \cdot (d_i - 0,2)}{0,46} \\ &= (d_i - 0,2) + \frac{0,1}{0,46} \cdot (d_i - 0,2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$d_i' \cong (d_i - 0,2) + 0,20 \cdot (d_i - 0,2) = 1,2 \cdot (d_i - 0,2) \quad (4)$$

La fórmula útil per calcular el volum de cada cel·la al Microsoft Excel finalment s'expressa així:

$$V_i = (d_i - 0,2) \cdot 1,2 \cdot 0,045^2 \quad (5)$$

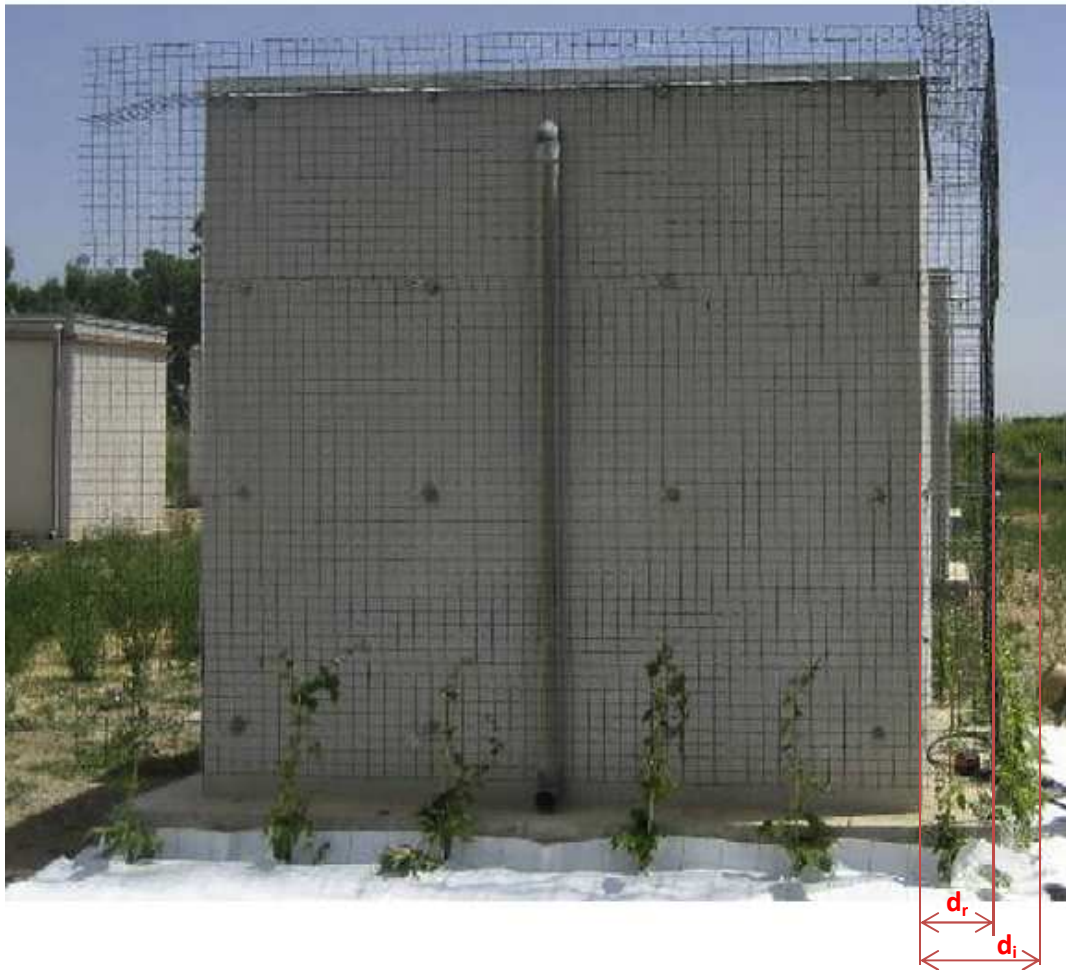


Figura 14. Vista en detall del sistema VGS en la seva etapa inicial amb les distàncies utilitzades pels càlculs.

2.6.1.2 Correcció de volums negatius.

En alguns casos es va observar que s'obtenia un resultat negatiu pel que fa al càlcul de volum de vegetació d'una cel·la. Aquest error succeïa en els casos en els que la distància d_i era menor als 0,2 m corresponents a la distància existent entre la paret i la malla. Al tractar-se d'un percentatge molt reduït, es va acordar que en aquests casos el volum seria considerat nul.



Així s'aconsegueix reduir l'error de càlcul i s'obté un resultat més ajustat. La correcció es du a terme implementant la següent ordre lògica:

$$d_i' = (d_i - 0,2) + \frac{0,1 \cdot (d_i - 0,2)}{(d_{max} - 0,2)} < 0 \Rightarrow d_i' = 0$$

2.6.2 Classificació de les cel·les per columnes, files i quadrants

Classificar cada cel·la segons la seva posició és de gran interès en aquest treball perquè permet analitzar amb més detall en quins quadrants o en quines zones la vegetació s'està desenvolupant millor i en quines zones cal reforçar. En un estudi anterior del càlcul del LAI (2015) d'aquesta façana enjardinada es va estudiar les façanes dividint-les en 9 quadrants de 1 m² (Figura 3) i, per tant, aquesta divisió és la que pren més importància, ja que en aquest treball es pretén observar si es pot relacionar els metres cúbics de vegetació amb el LAI (10).

Es van classificar les cel·les de 3 formes diferents; en columnes, en files i en quadrants. Donat que les parets del cub tenen unes dimensions de 3 m d'ample per 3 m d'alt es va decidir que es dividiria la paret de les formes mostrades en la Taula 3.

Això va ser possible gràcies a que cada cel·la té la informació de la seva posició mitjançant les seves coordenades X, Y i Z. El primer pas va ser classificar aquestes cel·les en files i columnes. Un cop es sap a quina fila i columna pertany cada cel·la, es classifiquen les cel·les per quadrants. Per exemple: una cel·la que pertany a la columna central i fila central, correspon al quadrant 5 (Taula 3).

Passos seguits per a classificar les cel·les que formen la façana:

1. Es va calcular la diferència entre la coordenada màxima i la mínima. Així, no només es va obtenir la longitud de la façana, sinó que també era una mesura de control que permetia saber si la neteja de punts s'havia fet correctament ja que aquesta longitud havia de ser lleugerament inferior a 3 m.
2. A partir de la coordenada mínima, es van crear les 3 files/columnes sumant 1 m d'alçada/amplada a les seves coordenades corresponents, creant així 3 rangs de coordenades que són els que van servir per classificar les cel·les.
3. Es va aplicar a cada cel·la una funció lògica que li assignava un valor numèric depenent de a quina fila/columna pertanyia.
4. Es van classificar en quadrants totes les cel·les amb una altra funció que assignava un valor numèric a cada cel·la a partir dels valors obtinguts de la classificació en files i columnes.

Un cop totes les cel·les van estar classificades segons els criteris que es poden veure en la Taula 3, ja es podia calcular quins volums de vegetació hi havia en cada una de les zones d'interès, i les dades ja estaven a punt per fer-ne el tractament estadístic i per obtenir-ne els resultats.



Taula 3. Formes en les que es van classificar les cel·les.

Columnes de 1 m d'amplada

| PER COLUMNES | | |
|--------------|----|----|
| 1a | 2a | 3a |

Files de 1 m d'altura

| PER FILES |
|-----------|
| 3a |
| 2a |
| 1a |

Quadrants de 1 m d'amplada per 1 m d'altura.

| PER QUADRANTS | | |
|---------------|---|---|
| 7 | 8 | 9 |
| 4 | 5 | 6 |
| 1 | 2 | 3 |

3 RESULTATS

3.1 Caracterització del volum de vegetació per façanes

En aquest apartat es mostra quin volum de vegetació hi ha en cada façana així com la seva distribució en files, columnes i quadrants.

3.1.1 Façana Est

Taula 4. Volum de vegetació total, per files, per columnes i per quadrants de la façana est en m³

| | | COLUMNES | | | TOTAL |
|-------|----|----------|-------|-------|-------|
| | | 1a | 2a | 3a | |
| FILES | 3a | 0,336 | 0,385 | 0,346 | 1,069 |
| | 2a | 0,324 | 0,407 | 0,399 | 1,131 |
| | 1a | 0,286 | 0,401 | 0,397 | 1,084 |
| TOTAL | | 0,946 | 1,194 | 1,143 | 3,284 |

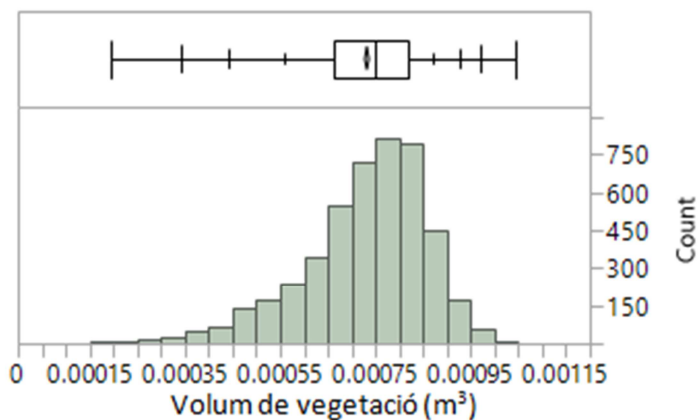


Figura 16. Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació per cel·la de la façana est.

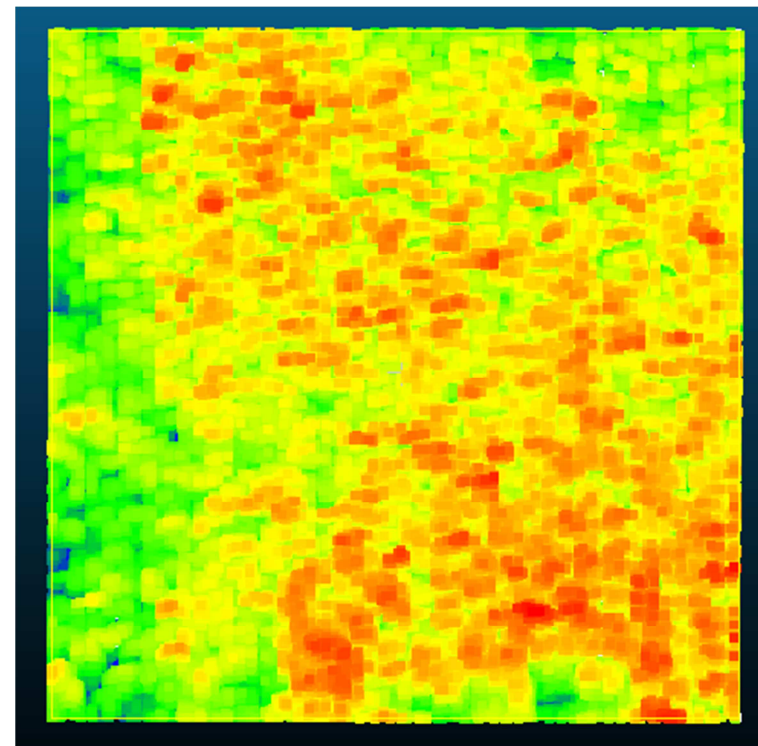


Figura 15. Núvol de punts de la façana est. El color dels punts ens indica la distància d'aquests respecte la paret essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans.

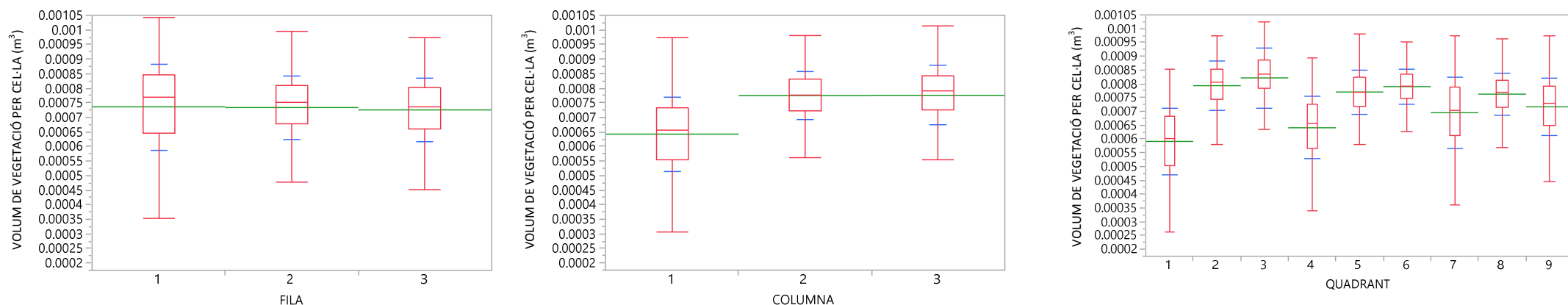


Figura 17. Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) del volum de vegetació per cel·la per les diferents files, columnes i quadrants de la façana est.

Taula 5. Comparació de mitjanes de volum de vegetació per cel·la de la façana est per files columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$, segons la prova de Tukey-Kramer HSD.

| Fila | Volum de vegetació mitjà (m³) | Columna | Volum de vegetació mitjà (m³) | Quadrant | Volum de vegetació mitjà (m³) |
|------|-------------------------------|---------|-------------------------------|----------|-------------------------------|
| 1 | 0,00073584a | 3 | 0,00077583a | 3 | 0,00082098a |
| 2 | 0,00073382ab | 2 | 0,00077496a | 2 | 0,00079297b |
| 3 | 0,00072518b | 1 | 0,00064219b | 6 | 0,00078938b |
| | | | | 5 | 0,00076987c |
| | | | | 8 | 0,00076226c |
| | | | | 9 | 0,00071651d |
| | | | | 7 | 0,00069509e |
| | | | | 4 | 0,00064056f |
| | | | | 1 | 0,00059098g |

Es va observar que la columna 1 estava força més des poblada que la 2 i la 3, fàcilment visible en la Taula 4, la Figura 15 i la Figura 17. Per tant, cuidar la columna 1 s'hauria de convertir en la prioritat per millorar el rendiment del VGS en aquesta façana.

3.1.2 Façana Oest

Taula 6. Volum de vegetació total, per files, columnes i per quadrants de la façana oest en m³.

| | | COLUMNES | | | TOTAL |
|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| | | 1a | 2a | 3a | |
| FILES | 3a | 0,225 | 0,237 | 0,249 | 0,711 |
| | 2a | 0,392 | 0,392 | 0,392 | 1,176 |
| | 1a | 0,411 | 0,427 | 0,423 | 1,261 |
| | TOTAL | 1,028 | 1,055 | 1,064 | 3,147 |

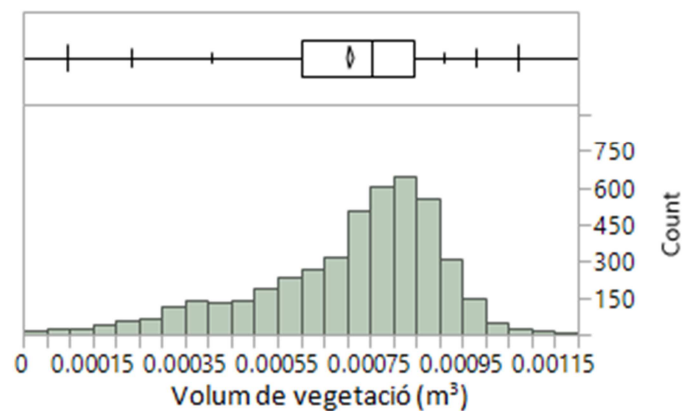


Figura 19. Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació per cel·la de la façana oest.

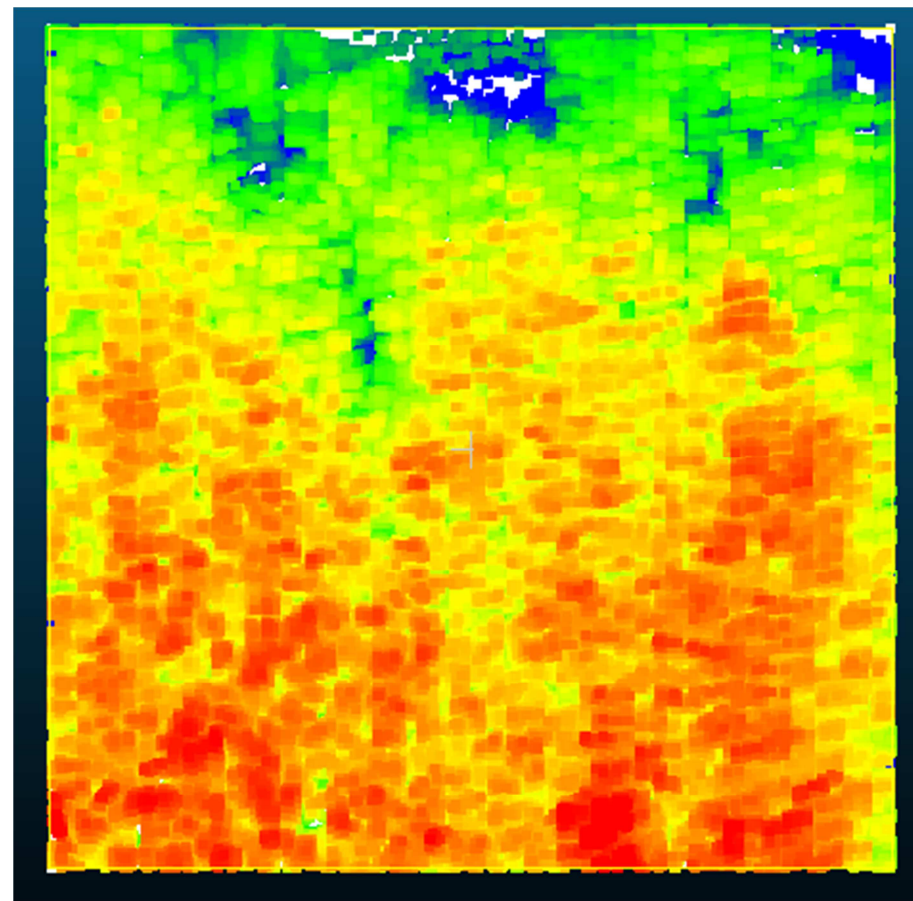


Figura 18. Núvol de punts de la façana oest. El color dels punts ens indica la distància d'aquests respecte la paret essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans.

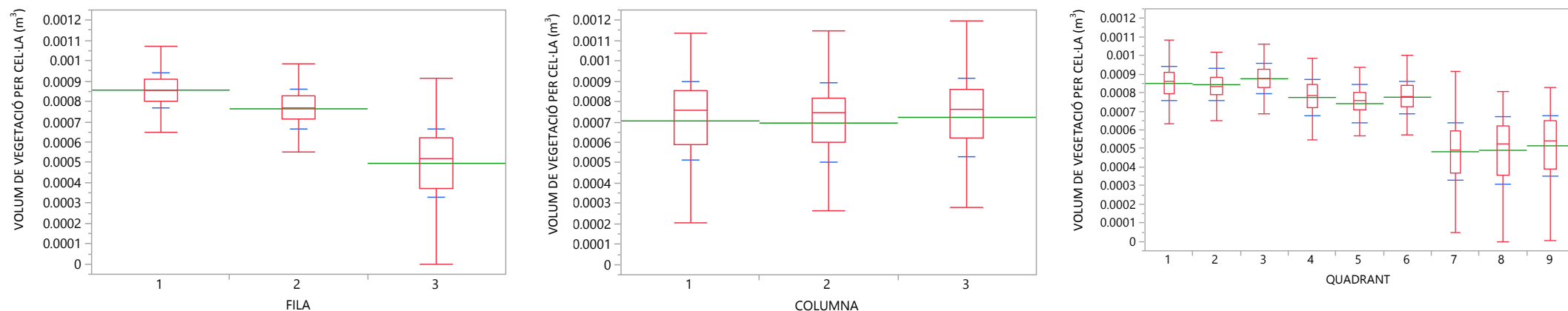


Figura 20. Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) de les diferents files, columnes i quadrants de la façana oest.

Taula 7. Comparació de mitjanes de volum de vegetació per cel·la de la façana oest per files columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$, segons la prova de Tukey-Kramer HSD.

| Fila | Volum de vegetació mitjà (m³) | Columna | Volum de vegetació mitjà (m³) | Quadrant | Volum de vegetació mitjà (m³) |
|------|-------------------------------|---------|-------------------------------|----------|-------------------------------|
| 1 | 0,00085544a | 3 | 0,00072214a | 3 | 0,00087452a |
| 2 | 0,00076312b | 1 | 0,00070563ab | 1 | 0,00084947b |
| 3 | 0,00049554c | 2 | 0,00069496b | 2 | 0,00084290b |
| | | | | 6 | 0,00077569c |
| | | | | 4 | 0,00077382c |
| | | | | 5 | 0,00074087d |
| | | | | 9 | 0,00051379e |
| | | | | 8 | 0,00048969ef |
| | | | | 7 | 0,00048268f |

En aquest cas, a la Taula 6, la Figura 18 i la Figura 20 es va observar que la façana oest mostrava grans diferències pel que fa a volum de vegetació depenent de l'alçada. Tot i que era d'esperar que la vegetació decreixi en volum a mesura que guanya alçada, es tractava d'una diferència molt significativa (Taula 7) i corregir-ho seria la prioritat d'aquesta façana. En la Figura 18, les zones blanques indiquen un espai buit, és a dir, que no es va aconseguir tenir la vegetació totalment desenvolupada en aquesta façana.

3.1.3 Façana Sud

Taula 8. Volum de vegetació total, per files, columnes i per quadrants de la façana sud en m^3 .

| | | COLUMNES | | | TOTAL |
|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| | | 1a | 2a | 3a | |
| FILES | 3a | 0,300 | 0,332 | 0,292 | 0,924 |
| | 2a | 0,402 | 0,393 | 0,322 | 1,117 |
| | 1a | 0,403 | 0,337 | 0,272 | 1,012 |
| | TOTAL | 1,105 | 1,062 | 0,886 | 3,053 |

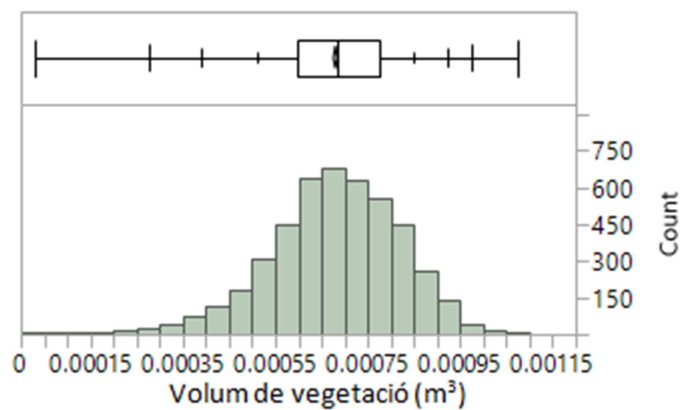


Figura 22. Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació per cel·la de la façana sud.

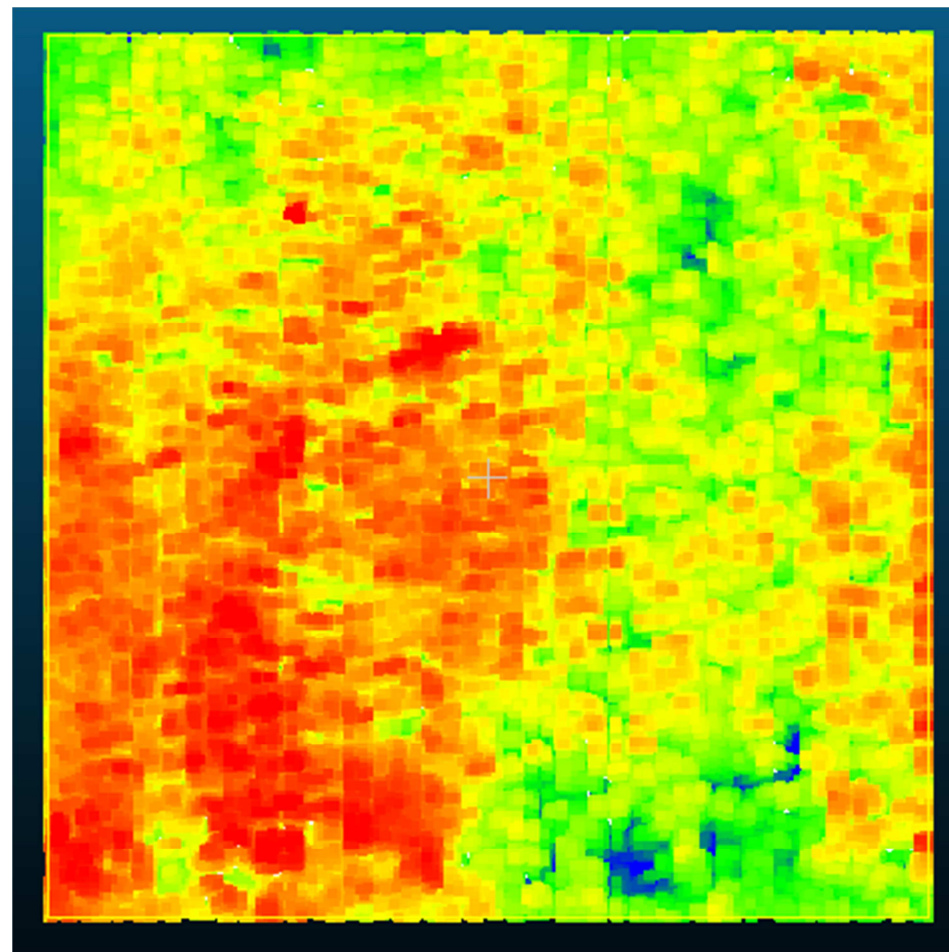


Figura 21. Núvol de punts de la façana sud. El color dels punts ens indica la distància d'aquests respecte la paret essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans.

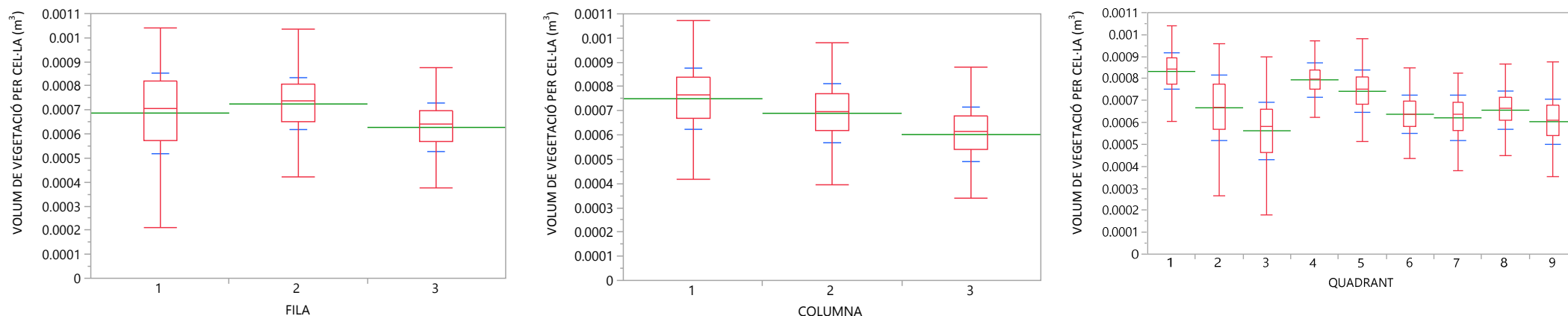


Figura 23. Diagrames de caixa (box plot) , mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) de les diferents files, columnes i quadrants de la façana sud.

Taula 9. Comparació de mitjanes de volum de vegetació per cel·la de la façana est per files columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$, segons la prova de Tukey-Kramer HSD.

| Fila | Volum de vegetació mitjà (m³) | Columna | Volum de vegetació mitjà (m³) | Quadrant | Volum de vegetació mitjà (m³) |
|------|-------------------------------|---------|-------------------------------|----------|-------------------------------|
| 2 | 0,00072480a | 1 | 0,00074970a | 1 | 0,00083227a |
| 1 | 0,00068646b | 2 | 0,00068905b | 4 | 0,00079413b |
| 3 | 0,00062720c | 3 | 0,00060133c | 5 | 0,00074224c |
| | | | | 2 | 0,00066622d |
| | | | | 8 | 0,00065628de |
| | | | | 6 | 0,00063724ef |
| | | | | 7 | 0,00062069fg |
| | | | | 9 | 0,00060330g |
| | | | | 3 | 0,00056181h |

La façana sud va mostrar diferències significatives en el volum de vegetació tant en files com en columnes (Taula 9). A la Figura 21 es va observar que la columna 3 era la zona que calia reforçar, a la Figura 23 i a la Taula 9 es veu aquesta necessitat amb dades numèriques. En canvi la columna 1 i la fila 2 són les que es troben en millor estat.

3.2 Comparació entre façanes

En aquest apartat es mostra les diferències estadístiques entre façanes.

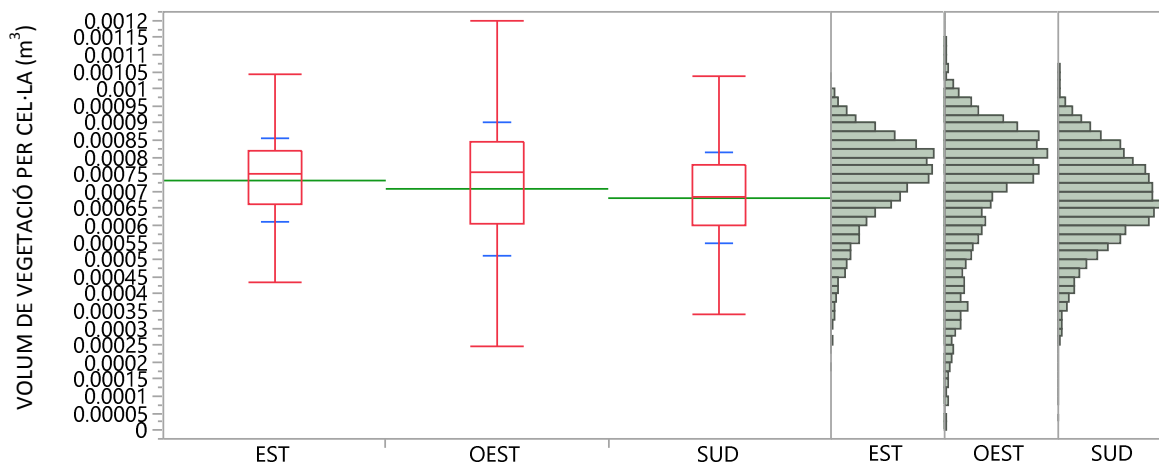


Figura 24. Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes), desviació estàndard (línies blaves) i histogrames on es representa com es distribueix el volum total de les diferents façanes vegetades.

Taula 10. Comparació de mitjanes de volum de vegetació per cel·la per façanes. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$, segons la prova de Tukey-Kramer HSD.

| Façana | Volum de vegetació mitjà (m³) |
|--------|-------------------------------|
| EST | 0,00073165a |
| OEST | 0,00070746b |
| SUD | 0,00068016c |

La Figura 24 ens mostra que la façana est era la que tenia una mitjana de volums per cel·la més alta i la Taula 10 ens indica que les façanes mostraven una diferència amb un nivell de significació α . Té sentit perquè com s'ha vist en l'apartat 3.1 la façana est era la que presentava un volum de vegetació més elevat, seguida per la façana oest i finalment per la façana sud.

Les 3 façanes coincidien en tenir la fila 3 com la fila amb menys volum de vegetació, dada indicativa de que a mesura que es guanya alçada costa més mantenir un bon volum de vegetació. En canvi, l'anàlisi per columnes rebel·la que l'orientació de la façana fa que la vegetació es desenvolupi sense seguir cap norma.

3.3 Comparació entre sensors i relació dels volums per quadrants segons el sensor

En aquest apartat es compara els resultats de volums obtinguts a través dels 2 tipus de sensors utilitzats: el sensor tipus LiDAR i el sensor Kinect2.

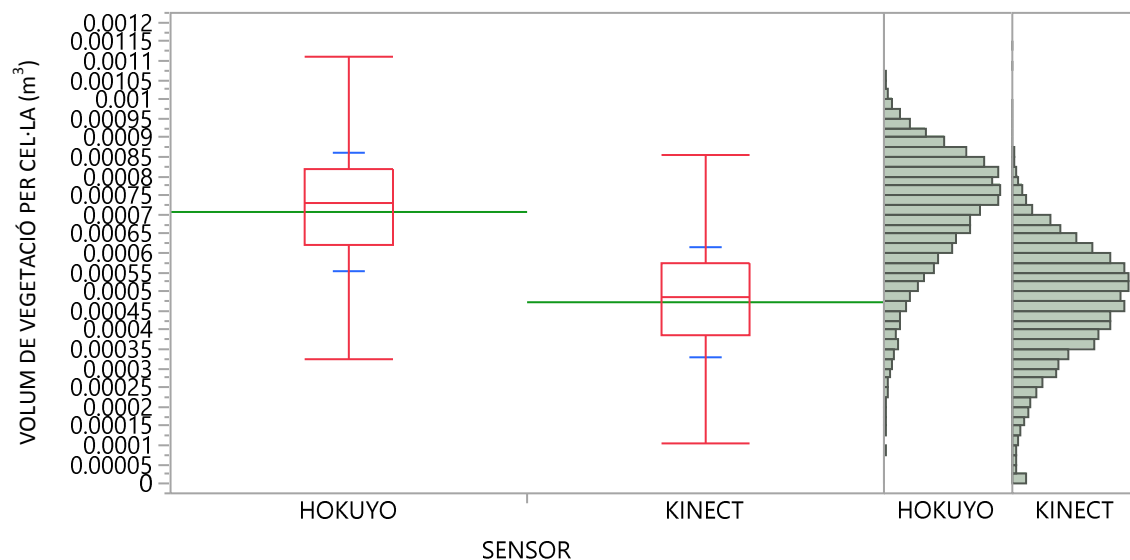


Figura 25. Diagrama de Caixa (box plot), mitjanes (línies verdes), desviació estàndard (línies blaves) i histogrames del volum total de les façanes en els diferents sensors.

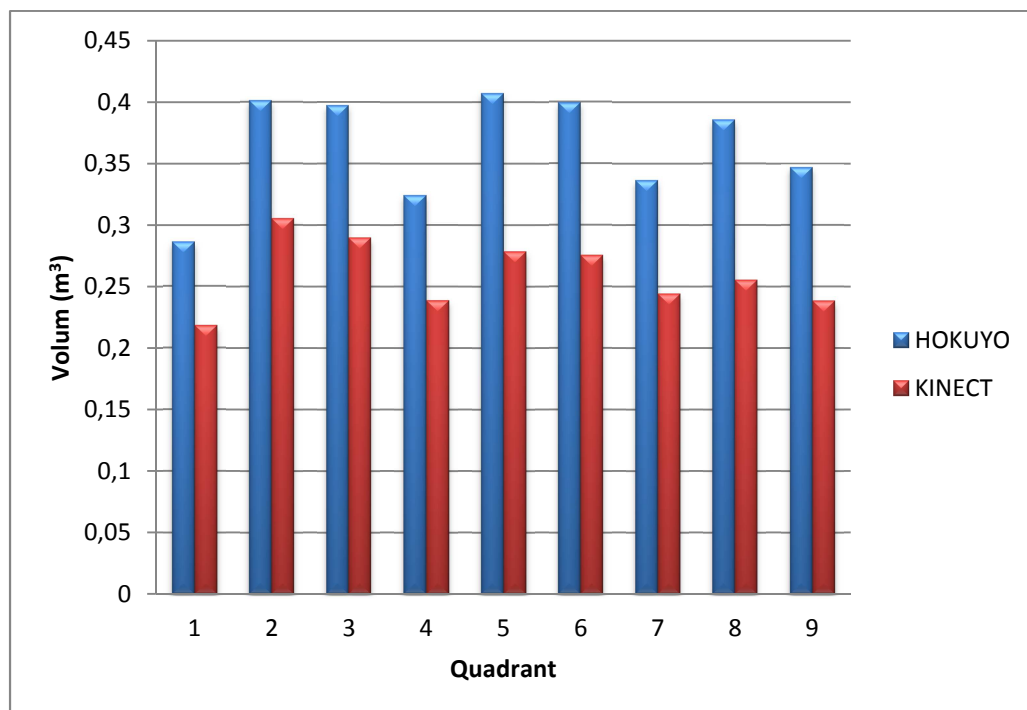


Figura 26. Comparació dels volums de vegetació calculats en els diferents quadrants de la façana est segons el sensor utilitzat.

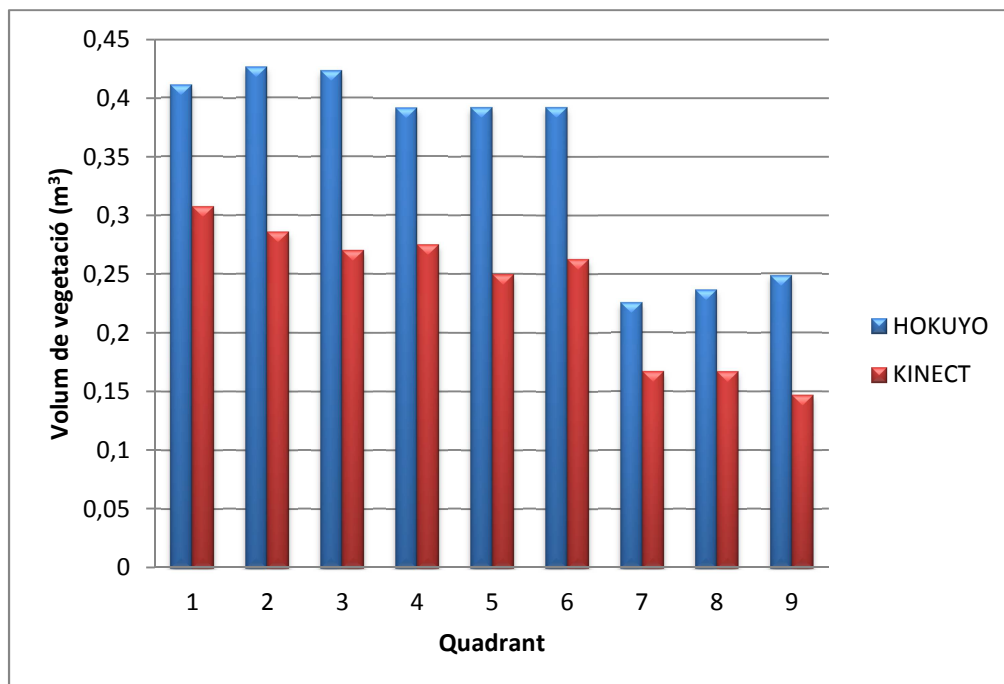


Figura 27. Comparació dels volums de vegetació calculats en els diferents quadrants de la façana oest segons el sensor utilitzat.

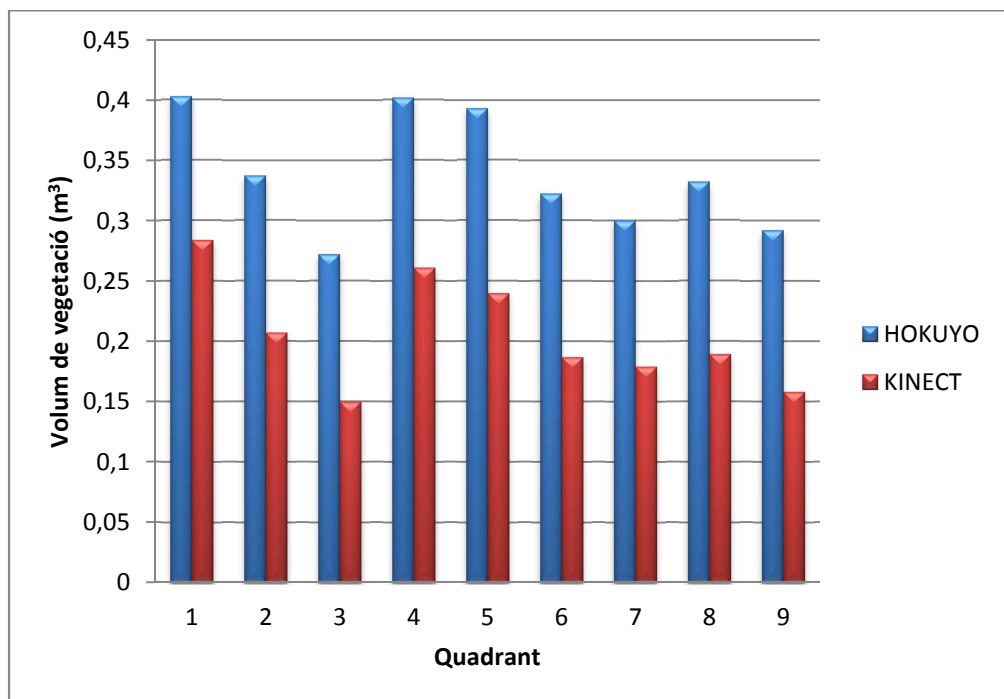


Figura 28. Comparació dels volums de vegetació calculats en els diferents quadrants de la façana sud segons el sensor utilitzat.

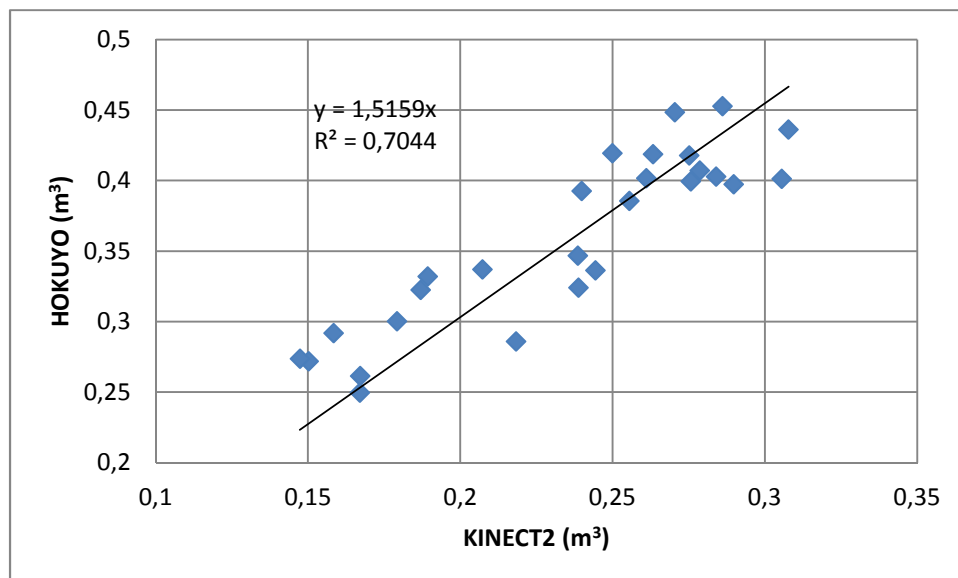


Figura 29. Ajust del model lineal que relaciona el volum de vegetació entre sensors.

Els resultats graficats a la Figura 26, a la Figura 27 i a la Figura 28 ens mostren com els valors de volum de vegetació van ser sempre majors en el cas del sensor Hokuyo. També es va estudiar com estaven relacionats i es va determinar que els resultats del sensor Hokuyo majoraven aproximadament un 52% els resultats obtinguts amb el sensor Kinect2.

3.4 Relació entre volum de vegetació i LAI

En aquest apartat s'ajusta un model lineal entre els valors obtinguts de volum de vegetació de les diferents façanes amb les lectures indirectes de LAI de 2015 (Figura 4). L'ajust es va realitzar amb les dades dels quadrants 1, 3, 4, 6, 7 i 9 perquè les dades de LAI dels quadrants 2, 5 i 8 es van calcular fent mitjanes. També es mostra l'ajust lineal entre els valors obtinguts de volum de vegetació dels quadrants 2, 5 i 8 de la façana est amb les dades directes de LAI (2013) (Taula 1).

3.4.1 Lectures de LAI indirecte

3.4.1.1 Façana Est

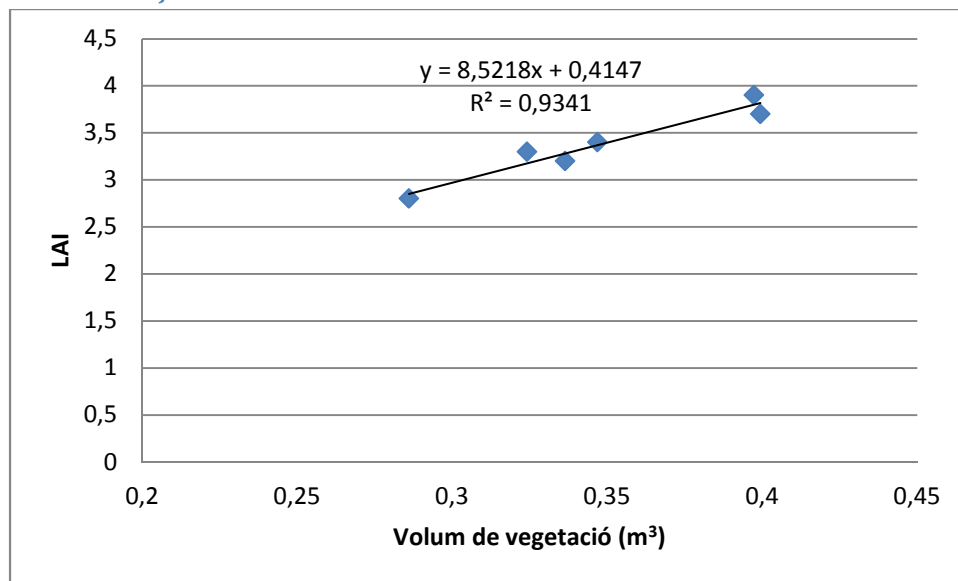


Figura 30. Ajust del model lineal entre el volum de vegetació i el LAI mesurat amb el ceptòmetre el 2015 dels quadrants 1, 3, 4, 6, 7 i 9 de la façana est.

3.4.1.2 Façana Oest

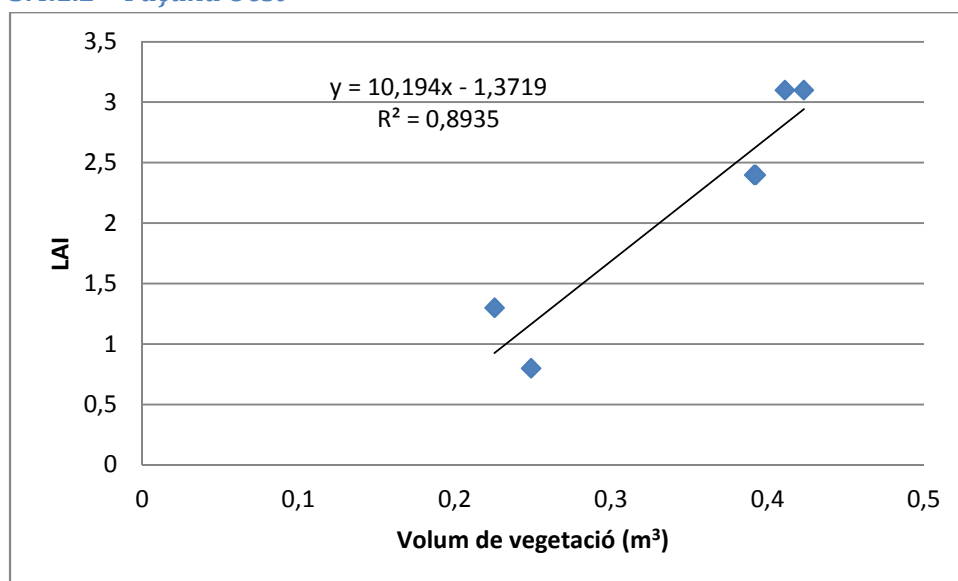


Figura 31. Ajust del model lineal entre el volum de vegetació i el LAI mesurat amb el ceptòmetre el 2015 dels quadrants 1, 3, 4, 6, 7 i 9 de la façana oest.

3.4.1.3 Façana Sud

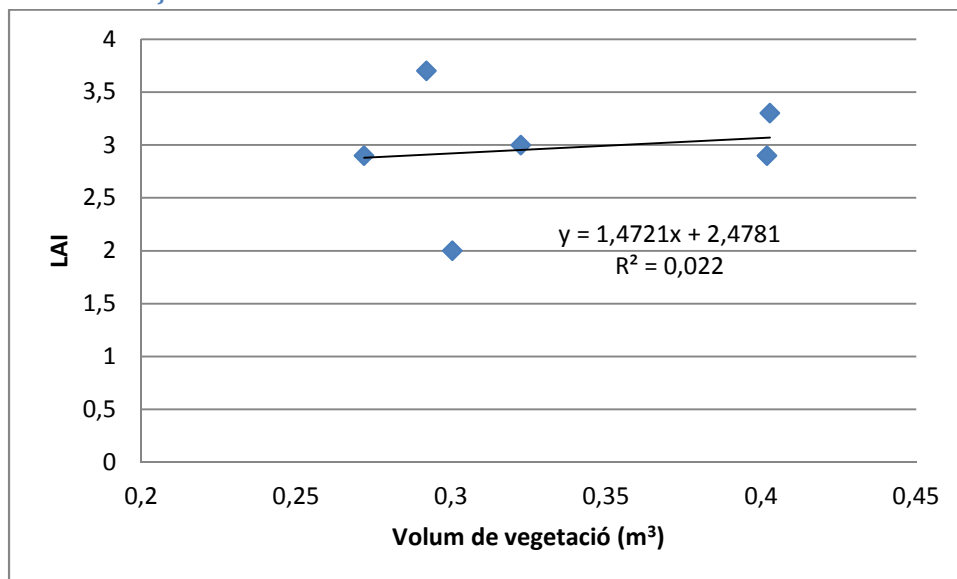


Figura 32. Ajust del model lineal entre el volum de vegetació i el LAI mesurat amb el ceptòmetre el 2015 dels quadrants 1, 3, 4, 6, 7 i 9 de la façana sud.

3.4.1.4 Cub experimental complet.

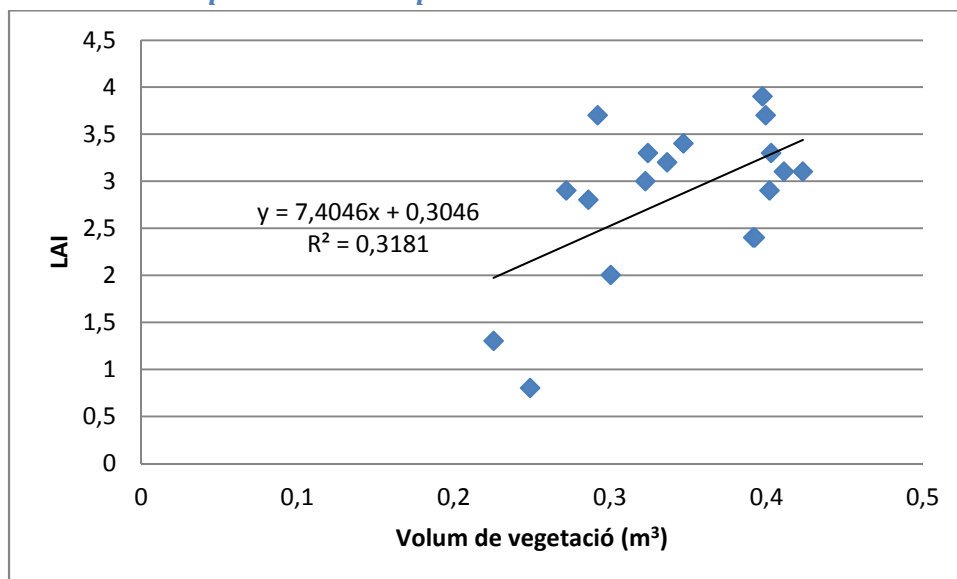


Figura 33. Ajust del model lineal entre el volum de vegetació i el LAI de tots els quadrants de les columnes 1 i 3 mesurat amb el ceptòmetre el 2015.

Pel que fa als diferents ajusts lineals entre el volum de vegetació i el LAI indirecte, la Figura 30 i la Figura 31 presenten un coeficient de determinació que supera el 89% en els 2 casos. En canvi, la Figura 32 presenta un coeficient de determinació del 2%, indicant un possible problema en l'anàlisi d'aquesta cara. Sense dubte, això afecta els resultats conjunts mostrats en la Figura 33 que presenta un coeficient de determinació gairebé del 32%.

3.4.2 Lectures de LAI directe (2013) - Façana Est

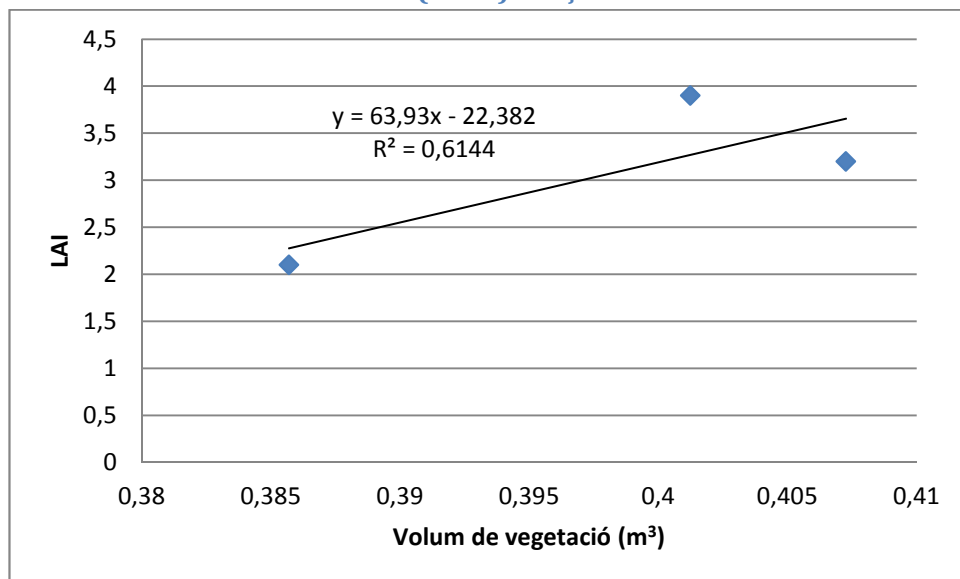


Figura 34. Ajust del model lineal entre el volum de vegetació dels quadrants 2, 5 i 8 de la façana est i el LAI calculat el 2013 de forma directa.

Pel que fa a l'ajust lineal entre el volum de vegetació i el LAI directe, la Figura 34 presenta un coeficient de determinació del 61%. Aquest valor, tot i ser bo, no es considera concloent degut a la poca variabilitat existent en els valors de volum de vegetació.

3.5 Relació entre volum de vegetació i temperatura

En aquest apartat es realitza una comparació entre el volum de vegetació obtingut en aquest treball pels quadrants 5 i 8 de cada façana amb les lectures de temperatures obtingudes en un estudi anterior (12). Les lectures de temperatura agafades corresponen a un període de 13 dies, i es pretén observar quina tendència hi ha entre volum de vegetació i temperatura, per a tenir un punt de partida de cara a futurs estudis (2).

Taula 11. Volum de vegetació del quadrant 5 i 8, distància mitjana de les cel·les del quadrant respecte la paret del cub, temperatura màxima en la paret del cub de referència, temperatura màxima en la paret del cub estudiat i mitjana de la diferència de temperatura entre el cub de referència i el cub estudiat en un període de 13 dies.

| Façana | Quadrant | Volum (m ³) | Distància mitjana (m) | T. màxima edifici referència (°C) | T. màxima edifici estudiat (°C) | ΔT mitjana (°C) |
|--------|----------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Est | 5 | 0,407 | 0,517 | 45 | 33 | 13,8 |
| | 8 | 0,386 | 0,514 | | | |
| Oest | 5 | 0,392 | 0,505 | 53 | 36 | 13,9 |
| | 8 | 0,237 | 0,402 | | | |
| Sud | 5 | 0,393 | 0,505 | 55 | 39 | 10,7 |
| | 8 | 0,332 | 0,470 | | | |

No s'ha pogut establir una relació directa entre les temperatures superficials i el volum de vegetació, ja que la temperatura de cada façana ve afectada tant per la radiació solar incident en la mateixa com per l'efecte convectiu de l'aire. Si que resulta de major interès estudiar la diferència de temperatures entre el cub de referència i el cub estudiat (Taula 11).

Pel que fa a la diferència entre temperatures màximes, per a entendre les causes d'una diferència de temperatures menors en aquells quadrants amb major volum de vegetació és important comprendre la dinàmica a la que estan subjectes les diferents façanes. La incidència del Sol en la façana est s'inicia en el pla horitzontal i finalitza en el vertical a mesura que passen les hores, en una zona horària on la temperatura normalment sol ser inferior. En la façana sud, la incidència es presenta totalment vertical i en el cas de la cara oest hi ha una incidència que va del pla vertical a l'horitzontal. Degut a aquest fet, cal conèixer la vegetació existent tant en el quadrant 5 com en el 8, on l'últim d'aquests jugarà un paper important en aquelles hores on el Sol es posicioni en posició vertical o propera a aquesta. La presència de vegetació en el quadrant superior afectarà en major mesura a la cara sud que a les façanes restants.

Sembla un contrasentit el fet que la diferència de temperatures màximes més petita es presenti en la façana est, essent aquesta la que té un major volum de vegetació. Cal tenir en compte però que la façana est és la que rep un menor nivell de radiació solar i tal com s'observa, la seva temperatura màxima és significativament inferior a les de les façanes oest i sud. Això significa que el marge de millora que pot suposar la implantació de façana vegetal en la cara est és menor que en les dues altres cares i per tant, explica el fet de tenir una menor diferència de temperatura tot i el seu major volum de vegetació.

Per a obtenir conclusions més fermes es va comparar també amb les mitjanes de la diferència de temperatura corresponents a un període de 13 dies. En aquest cas, els resultats segueixen la

tendència que s'esperava a l'inici del treball ja que la menor diferència de temperatura s'aconsegueix en la cara Sud, que coincideix en ser la façana amb un menor volum de vegetació.

Per últim comentar que resulta difícil establir relacions clares entre volum de vegetació i temperatura donat que intervenen altres factors com ara els mecanismes de radiació i de convecció imperants en cada moment. Així per exemple, en dies ennuvolats, la convecció predomina sobre la radiació i el comportament de la façana vegetal canviarà substancialment.

4 CONCLUSIONS

L'objectiu del treball era desenvolupar una metodologia amb la qual es pogués calcular el volum d'un model tridimensional de vegetació vertical. Els resultats mostren que és possible caracteritzar de forma precisa un sistema VGS amb l'escàner làser terrestre mòbil desenvolupat pel Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió basat en el sensor LiDAR Hokuyo UTM30-LX-EW.

La metodologia per a la obtenció del volum de vegetació del VGS amb un MTLs és objectiva, repetible i quantificable, permetent així la comprovació i comparació de resultats obtinguts amb estudis realitzats amb diferent vegetació, en diferents localitzacions i amb diferent climatologia.

Els resultats, en la majoria dels casos, mostren una tendència que fa pensar que si que es pot establir una correlació entre volum de vegetació i LAI. Aquest fet es pot observar en l'apartat 3.4, on es veu que el model lineal ajustat a les dades de LAI indirecte expliquen el 93% de la variabilitat en la façana est i el 89% de la variabilitat en la façana oest. En la façana sud el model lineal no s'ajusta com en les altres i es pensa que aquest fet es degut a que la mesura indirecta de LAI (2015) i l'escaneig de les façanes (2016) es van produir en anys diferents i és possible que l'estat de la vegetació fos significativament diferent. Més recerca es necessària per descobrir-ne els motius. El model lineal ajustat amb les dades del LAI obtingut directament amb mitjans destructius (2013) presenta una correlació que explica el 61,5% de la variabilitat però només hi ha 3 mesures. Tot i això, per a aquest treball no hi ha hagut suficient variabilitat en les lectures i per tant, aquests resultats són poc fiables, ja que en tots els casos es disposa d'una variació del rang petita. Per a obtenir resultats més fiables, en futurs estudis s'hauria de disposar de lectures que variïn al llarg de tot el rang de variació de les variables involucrades (volum de vegetació i LAI).

S'observa que la implementació d'un VGS redueix la temperatura de la paret del cub experimental respecte el cub de referència. En els resultats es mostra la diferència de temperatura generada pel VGS en un moment determinat i la mitjana al llarg de 13 dies, però per a establir una relació entre les dades de temperatura i el volum de vegetació manca disposar de lectures que variïn al llarg de tot el rang de variació de les variables involucrades, sobretot pel que fa a volum de vegetació. S'ha observat que un major volum de vegetació no es tradueix necessàriament en una major diferència de temperatura (Taula 11). I és que altres factors importants entren en joc: l'orientació de la façana, les hores d'exposició, inclús si el cel es mostra ennuvolat o no. Poder establir aquesta relació entre volum de vegetació i temperatures era de gran interès perquè permetia quantificar beneficis econòmics en el consum energètic dels edificis i queda com un assumpte pendent per a futurs estudis.

No es pot afirmar categòricament amb quin dels 2 sensors és millor realitzar aquest estudi, ja que els 2 tenen els seus punts a favor i en contra. Pel que fa a metodologia, per una banda, va ser més senzill començar a treballar amb les dades obtingudes del MTLs basat en el sensor Hokuyo pel fet de que els arxius ja venien ubicats segons la seva disposició real i en canvi amb els arxius del sensor Kinect2 s'havien de traslladar i rotar. Per l'altra banda, la neteja dels punts i la col·locació de la paret del cub experimental era més senzilla de dur a terme amb els arxius



del sensor Kinect2 gràcies a que es va disposar de la imatge amb color i de la col·locació d'elements externs a la façana que servien com a referència per col·locar acuradament la paret del cub.

A nivell de resultats, tot i obtenir volums de vegetació diferents segons el sensor utilitzat, es va observar que els resultats estaven relacionats de manera que el volum obtingut amb el sensor Hokuyo majorava aproximadament en un 52% el volum obtingut amb el sensor Kinect2. Això és interessant perquè si son equiparables a nivell qualitatiu, significa que es pot utilitzar el sensor Kinect2 per a la caracterització tridimensional d'un sistema de vegetació vertical. El que fa interessant poder treballar amb el sensor Kinect2 és la diferència de preu existent entre els 2 tipus de sensors, ja que el del sensor Kinect2 és molt inferior al del sensor Hokuyo. Per tant, es creu que es una via d'investigació a tenir en compte per futurs treballs.



5 BIBLIOGRAFIA

1. *Façanes vegetades: Estudi del seu potencial com a sistema passiu d'estalvi d'energia, en clima mediterrani continental*. **G, Pérez**. s.l. : Àmbits de recerca en l'energia i el medi ambient a l'arquitectura, 2010.
2. *Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades*. **Julià Coma, Gabriel Pérez, Alvaro de Garcia, Silvia Burés, Miguel Urrestarazu, Luisa F.Cabeza**. Lleida : Elsevier, 2017, Building and environment, p. 10.
3. *Logros y expectativas de la agricultura de precisión*. **Gregorio E, Escolà A, Planas de Martí S, Rosell J.R, Solanelles F, Martínez J.A**. s.l. : Agricultura , 2014. 1-6.
4. *Crop structure and the penetration of direct sunlight* . **Lang ARG, Yuegin X, Norman JM**. s.l. : Agric For Meteorol, 1985.
5. *Development of hydroponic systems for urban façade greenery. In: Proceedings of international symposium on soilless culture and hydroponics*. **Wolter S, Diebel J, Schroeder FG**. s.l. : Acta horticultura.
6. *Energy simulation of greenery systems*. **Wong NH, Tan AYK, Tan PY, Wong NC**. s.l. : Energy Build, 2009.
7. *Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy*. **Ip K, Lam M, Miller A**. s.l. : Energy Build, 2010.
8. *A model of vegetated exterior façades for evaluation of wall thermal performance*. **Susorova I, Angulo M, Bahrami P, Stephens B**. s.l. : Build Environ, 2013.
9. *Modelling the energy performance of living walls: validation against field measurements in temperate climate*. **Scarpa M, Mazzali U, Peron F**. s.l. : Energy Build, 2014.
10. *Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings*. **Pérez G, Rincón L, Vila A, González JM, Cabeza LF**. s.l. : Appl Energy, 2011.
11. *New green facades as passive systems for energy savings on buildings*. **Coma J, Pérez G, Solé C, Castell A, Cabeza LF**. s.l. : Energy Proc, 2014.
12. *Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area*. **Pérez G, Coma J, Sol S, Cabeza LF**. s.l. : Applied Energy, 2017.
13. *A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops*. **Rosell JR, Sanz R**. s.l. : Comp an Electronics in agriculture, 2012.